

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

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»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор физико-математических наук

профессор Рабинский Лев Наумович

Москва 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ И МЕТОДАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ.....	9
1.1 Краткие сведения о защитных порошковых полимерных красках.....	16
1.2 Косвенные методы определения механических свойств покрытий.....	23
1.3 Растяжение свободных пленок	30
1.4 Методика изготовления образцов стальных пластин с покрытиями на эпоксидно- полиэфирной основе	33
2 МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЯ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН С ПОКРЫТИЯМИ НА ЭПОКСИДНО- ПОЛИЭФИРНОЙ ОСНОВЕ МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ	36
2.1 Методика проведения и обработки эксперимента.....	38
2.2 Результаты измерений	42
2.3 Конечно-элементное моделирование процесса наноиндентирования.....	45
2.4 Выводы.....	46
3 ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ С ПОКРЫТИЯМИ НА ИЗГИБ	48
3.1 Результаты испытаний.....	48
3.2 Оценка модуля упругости покрытия на основе результатов испытаний на изгиб образцов с двусторонним покрытием	50
3.3 Определение модуля Юнга покрытий из испытания образцов с односторонним покрытием и с учетом остаточных напряжений	53
4 ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ С ПОКРЫТИЯМИ НА РАСТЯЖЕНИЕ	71
4.1 Результаты испытаний.....	72
4.2 Моделирование одноосного растяжения образцов с покрытиями.....	76
5 ИСПЫТАНИЯ ПЛАСТИН С ПОКРЫТИЯМИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ СЖАТИИ	78
5.1 Методика испытаний и расчетов	78
5.2 Результаты испытаний.....	81
5.3 Моделирование результатов испытаний.....	83
5.4 Испытания на устойчивость после изгиба.....	89
6 ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ В ПОКРЫТИЯХ.....	91
7 ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ	98
7.1 Аналитическая оценка прочности покрытия в условиях испытаний на отрыв консольно- закрепленного образца.....	98
7.2 Численное моделирование испытаний на трехточечный изгиб образцов с покрытием в условиях стесненных сдвиговых деформаций	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	126

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные покрытия широко применяются в различных областях техники для защиты элементов конструкций от коррозии, для обеспечения электрической изоляции, для управления фрикционными характеристиками поверхностей, в декоративных целях и т.д. [1]. Достоверная идентификация механических свойств покрытий является важной задачей с точки зрения обеспечения их прочности и износостойкости в процессе эксплуатации [1-8]. В настоящей диссертационной работе проводится определение механических свойств покрытий на эпоксидно-полиэфирной основе, применяемых для защиты от коррозии элементов конструкций авиационной техники. На основе последовательности экспериментальных исследований и теоретических расчетов определяется модуль упругости материала покрытия, действующие в нем остаточные напряжения, возникающие вследствие применения термообработки в процессе нанесения покрытий [9-13] и адгезионная прочность покрытия к подложке в условиях сложнонапряженного нагружения.

Полученные результаты могут быть использованы как для оценки прочности и долговечности материала покрытий, так и для оценки их влияния на механическое поведение защищаемых тонкостенных конструкций. При проведении прочностных расчетов крупногабаритных конструкций влиянием покрытий можно пренебрегать, если толщина стенок изделий значительно превышает толщину покрытий и жесткость покрытий намного ниже жесткости материала конструкции. Однако, если толщина покрытия сопоставима с толщиной элемента конструкции и если покрытия обладают достаточной жесткостью, то их влиянием при определенных вариантах нагружения пренебречь нельзя. С точки зрения прочностных расчетов тонкостенные металлические элементы конструкций с полимерными покрытиями могут быть представлены в виде двух- или трехслойных пластин (в зависимости от того, с одной или с двух сторон нанесено покрытие) с более жестким средним слоем из металла и значительно более податливыми внешними слоями-покрытиями [10-11]. В

настоящее время известно не так много экспериментальных и теоретических работ, в которых проведен анализ макроскопического механического поведения подобного рода элементов конструкций с учетом эффектов влияния остаточных напряжений. Можно отметить большое разнообразие работ в области исследования функционально-градиентных тонкостенных конструкций с покрытиями (например, [11, 14-16]). Однако, в таких структурах обычно подразумевается, что жесткость поверхностных слоев выше, по сравнению с внутренней областью. Это такие структуры, как, например, металлические изделия с керамическими покрытиями или с упрочненными приповерхностными зонами. Исследованию тонкостенных конструкций с жестким средним слоем и податливыми тонкими внешними слоями уделено не так много внимания. В линейных задачах статики, действительно, как показывают эксперименты, влиянием тонких покрытий можно пренебрегать. В более специфических задачах, например, в условиях конечных деформаций, нелинейной упругости, в задачах устойчивости и вибрационного нагружения тонкостенных конструкций с покрытиями, пренебрежение влиянием покрытий может приводить к погрешностям расчетов. Таким образом, в настоящей работе проводится исследование собственных свойств механических покрытий, дается оценка действующих в них остаточных напряжений и их прочности, и проводится анализ влияния покрытий на механическое поведение тонких металлических пластин при статическом нагружении.

Актуальность определяется растущими требованиями к долговечности и коррозионной стойкости современных конструкционных материалов. 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:

-получены новые результаты по исследованию влияния эпоксидно-полиэфирных покрытий на механические свойства подложки с покрытием при испытаниях на растяжении, сжатие и изгиб.

-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.

- на основе численного и аналитического моделирования показана возможность и 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:

- результаты экспериментального исследования механических характеристик эпоксидно-полиэфирных покрытий методом наноиндентирования;
- численное моделирование процесса наноиндентирования, в котором 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;
- 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;
- результаты исследования влияния покрытий на поведение металлических пластин в испытаниях на растяжение, изгиб и устойчивость при комнатной и повышенной температуре.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях:

- международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г.Горшкова. Москва, МАИ, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 гг.

- международный научный семинар "Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы", Москва, МАИ, 2014, 2016, 2017 гг.

- международная научно-практическая конференция «Проблемы безопасности на транспорте», Респ. Беларусь, гос. ун-т трансп. Гомель 2019 г.

Публикации.

По теме диссертационной работы опубликовано 5 работ, в том числе 2 научные работы в журнале из списка Scopus и 3 научные работы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК РФ:

1. 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) pp. 490-497
2. 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), pp. 193-202
3. 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).
4. 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).

5. 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).

1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ И МЕТОДАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ

Лакокрасочные покрытия служат барьером, препятствующим диффузии и ограничивающим доступ агрессивной среды к защищаемой поверхности. При введении в лакокрасочные материалы ингибиторов коррозии или пассиваторов защитное действие покрытий усиливается. Лакокрасочные покрытия имеют ряд преимуществ перед другими видами защитных покрытий:

- простота нанесения и возможность применения для защиты оборудования и металлоконструкций больших габаритов и сложной конфигурации,
- возможность подновления и ремонта лакокрасочного покрытия непосредственно на месте эксплуатации,
- возможность сочетания лакокрасочного покрытия с другими методами защиты, что позволяет использовать его в более жестких коррозионных условиях,
- возможность получения покрытия любого цвета,
- более низкая стоимость по сравнению с другими видами защитных покрытий [17]

Комплекс свойств, требуемых от лакокрасочного покрытия, как правило, нельзя обеспечить за счет одного слоя, поэтому необходимо наносить последовательно несколько слоев лакокрасочных материалов: грунтовочный слой (грунт), промежуточный или функциональный слой, покрывной (внешний) слой [18-19]. Грунтовочный слой обеспечивает хорошую адгезию лакокрасочного покрытия к подложке, защищает подложку от воздействия разрушающих факторов, защищает последующие слои покрытия от воздействия подложки (например, zelochek, выделяющихся из бетона, или пластификатора из пластмасс). Промежуточный слой усиливает защитные функции грунтовочного слоя, обеспечивает выравнивание неровностей грунта и подложки, максимально улучшает функциональные свойства покрытия (светоотражение, торможение диффузии и др.), повышает стойкость покрытия к механическим воздействиям. Покрывной слой принимает на себя все виды внешних воздействий и

обеспечивает: основную защиту от воздействия атмосферы (УФ-излучения, осадков, влажности воздуха), химических агентов (кислоты, щелочи, агрессивных газов) и растворителей (жидкое моторное топливо); решение функциональных задач (декоративные, оптические, электрические и др.). Методы и технология нанесения порошковых полимерных покрытий подробно рассмотрены в работе Т.И. Кантеновой и др. [20]. А в монографии И.П. Верещагина описаны технология и оборудование для нанесения полимерных покрытий в электростатическом поле [21].

Лакокрасочные материалы можно разделить на три группы: органорастворимые лакокрасочные материалы ЛКМ (лакокрасочные материалы естественной сушки, лакокрасочные материалы горячей сушки), водоразбавляемые лакокрасочные материалы, безрастворительные лакокрасочные материалы (двухупаковочные составы, материалы для покрытий фотохимического и электронного отверждения, порошковые краски).

Все порошковые могут быть разделены на две большие группы: термопластичные и термореактивные [18]. Термопластичные ЛКМ формируют покрытия без химических реакций, лишь за счет сплавления частиц и гранул наполненного полимера при нагревании. Образующиеся из них покрытия термопластичны, обратимы. Их применяют преимущественно для получения покрытий функционального назначения – химически стойких, противокоррозионных, антифрикционных, электроизоляционных. Покрытия обычно наносят толстыми слоями – 250 мкм и более. Типичные области их применения – защита проволоки, труб, шлицевых валов и узлов трения, электроизоляция шин, переключателей и других изделий.

Термореактивные краски, в отличие от термопластичных, формируют покрытия посредством химических реакций при нагревании. Такие покрытия имеют трехмерное строение, они неплавки и нерастворимы, т. е. необратимы. Термореактивные краски служат для получения как функциональных покрытий, так и защитно-декоративных [22]. Для получения покрытий функционального назначения наиболее широко применяют составы на основе эпоксидных смол. Их

наносят слоями 100-150 мкм на нагретую поверхность в аппаратах кипящего слоя (многократно чередуя нагрев и погружение в порошок) или струйным распылением. Так наносят покрытия на роторы и статоры электродвигателей, на трубы – снаружи и изнутри, металлическую арматуру, сетку, катушки.

Основная доля потребления термореактивных красок приходится на защитно-декоративные покрытия, для которых внешний вид наиболее важен. Такие покрытия обычно имеют небольшую толщину (25-100 мкм). Наиболее распространенный способ их нанесения – электростатическое распыление.

Большинство порошковых ЛКМ состоит из небольшого числа компонентов: пленкообразователя (полимера или олигомера), пигментов и наполнителей, повышающих эксплуатационные и механические характеристики основного полимера, вспомогательных веществ и других целевых добавок [23].

К термореактивным краскам относятся эпоксидные, эпоксидно-полиэфирные, полиэфирные, полиакриловые краски.

Эпоксидные краски – это первый вид термореактивных порошковых материалов, освоенных в промышленности, имеющий применение до сих пор. Несмотря на то, что эпоксидные краски могут образовывать покрытия с хорошими декоративными свойствами, они используются, прежде всего, для получения функциональных покрытий. Существующие эпоксидные краски разнообразны по составу. В зависимости от типа смолы и отвердителя они образуют покрытия с разнообразными свойствами, в частности при соответствующем выборе сырья получены краски и покрытия, допускающие контакт с продуктами питания. Главный недостаток эпоксидных покрытий – низкая устойчивость к атмосферным воздействиям.

Главная область применения красок функционального назначения – электрическая изоляция и защита от коррозии. Эпоксидные краски явились хорошей альтернативой многим видам электроизоляции, ранее применявшимся в промышленности: обмотка лентой, компаундирование, окраска (пропитка) жидкими красками и др. Благодаря комплексу ценных свойств, простоте и низкой стоимости электроизоляции эпоксидные порошковые краски и компаунды

приобрели доминирующее значение в электротехнической и радиоэлектронной промышленности.

Эпоксидные порошковые краски широко используются в целях противокоррозионной защиты. Покрытия отличаются низкой стоимостью, простотой обслуживания и долговременной защитой в разных агрессивных средах. Для них характерны гибкость, ударопрочность, низкая проницаемость, хорошая термостойкость и адгезия. Краски могут быть нанесены тем или иным способом на холодную или предварительно нагретую поверхность. После отверждения они могут длительно эксплуатироваться при температурах до 150 °С. Как электроизоляционные по стойкости к нагреванию их относят к классу В (130 °С). В отличие от материалов функционального назначения краски защитно-декоративного назначения предназначены для получения покрытий небольшой толщины. Их выбирают в соответствии с конкретными требованиями.

Эпоксидно-полиэфирные (гибридные) краски, рассматриваемые в настоящей работе, более устойчивы, чем эпоксидные, к пожелтению, вызванному перегревом в момент отверждения покрытий. В меньшей степени проявляются меление и изменение цвета покрытий при эксплуатации в атмосферных условиях. Тем не менее, гибридные покрытия, как и эпоксидные, не рекомендуется применять в условиях воздействия солнечного света. Механические свойства (гибкость, твердость, ударопрочность) покрытий в основном такие же как и у эпоксидных, а стойкость к воздействию химикатов несколько ниже. Эпоксидно-полиэфирные покрытия также наносятся электростатическим способом. Частицы сухого порошка, нанесенные на твердую поверхность, удерживаются на ней преимущественно за счет сил электростатического притяжения. Смачивание происходит, когда частицы порошка расплавляются. Присутствующие на поверхности примеси и загрязнения мешают ее смачиванию. В результате не образуется должного контакта расплава с окрашиваемой поверхностью, что отрицательно сказывается на адгезии, а иногда и внешнем виде покрытий.

Основой полиэфирных красок, как и гибридных, являются карбоксилсодержащие полиэфирные. В качестве отвердителя для них в течение

длительного времени применяют триглицидилизоцианурат. Покрытия, полученные из такого состава, атмосферостойки и не склонны к пожелтению. Они имеют высокую твердость и относительно хорошо противостоят воздействию химических сред, поэтому такие составы широко используют для окрашивания изделий наружного применения.

Полиакриловые краски получают на основе полимеров и сополимеров алкилакрилатов. Полиакриловые порошковые краски по области применения конкурируют с полиэфирными. Так как они более дороги, их выпускают в меньших количествах и используют в тех случаях, когда от покрытий требуется особенно хороший внешний вид и высокая атмосферо- и химическая стойкость.

В зависимости от условий изготовления, обработки и хранения металла на его поверхности могут присутствовать различные виды загрязнений. Различают загрязнения органической (минеральные масла и смазки, мыла, остатки полировочных паст и жидкостей) и неорганической природы (оксиды и гидроксиды металла, шлаки, цеховая пыль и др.). При выборе способа очистки обычно учитывают природу загрязняющих веществ и степень загрязнения ими поверхности [24-25]. Для удаления масляных и жировых загрязнителей, которые наиболее распространены, обычно используют водные щелочные составы, растворы моющих средств и органические растворители. Жирные кислоты и компоненты полировочных паст требуют более концентрированных щелочных растворов и одновременно применение механических воздействий. Оксиды обычно удаляют с помощью кислот, процесс ускоряется с увеличением силы и концентрации кислоты и повышением температуры. Загрязнения макрочастицами, к которым относят цеховую пыль, цеховую сажу, твердые компоненты от полировочных жидкостей и паст, обычно удаляются одновременно с оксидами при применении кислотных составов, но могут быть достигнуты хорошие результаты и в случае щелочных моющих средств.

Порошковые краски наносятся на детали либо электростатическим распылением, либо их погружением в псевдооживленный слой (с электризацией частиц или без нее), либо методом газоплазменного распыления.

Электростатическое распыление наиболее удобно и обеспечивает лучший контроль толщины покрытия. Оно стало основным методом нанесения покрытий в промышленности.

В установке для нанесения покрытий порошок наполненного полимера, находящийся в специальном бункере (питателе), приводится в псевдооживленное состояние (флюидизируется) при помощи сжатого воздуха. Эжектор забирает порошок из бункера и переносит его к распылителю. Пульт управления используется для контроля подачи порошка и воздуха, а также для поддержания параметров распыления. В распылителе порошку сообщается электрический заряд путем ионной бомбардировки в электрическом поле (метод зарядки коронным разрядом) или трением (метод трибостатической зарядки).

В системах зарядки коронным разрядом к зарядным электродам распылителя подается высокое напряжение, и между распылителем и заземленной деталью создается сильное электрическое поле.

В большинстве случаев в системах зарядки коронным разрядом используется отрицательная полярность зарядного электрода. Напряженность электрического поля достигает максимального значения у конца зарядного электрода, и при достижении некоторого уровня здесь происходит коронный разряд. Коронный разряд представляет собой тип холодной плазмы, когда в области короны появляются свободные электроны, которые заполняют пространство между распылителем и деталью. Эти электроны присоединяются к молекулам воздуха, создавая, таким образом, отрицательные ионы. Если электрическое поле за пределами области коронного разряда имеет достаточную напряженность, то ионы, в свою очередь, будут присоединяться к частицам порошка по мере его распыления.

В результате между распылителем и деталью создается облако заряженных частиц порошка и свободных (неприсоединившихся) ионов. Совокупный заряд частиц порошка и свободных ионов, составляющих облако, называется «пространственным зарядом». Пространственный заряд создает свое собственное

электрическое поле, которое взаимодействует с полем высоковольтного электрода и помогает осаждению частиц порошка на заземленную подложку.

Зарядка коронным разрядом является наиболее широко используемой технологией зарядки порошка. Ее преимущества обусловлены следующими достоинствами:

- высокой эффективностью зарядки почти всех порошковых материалов, применяемых в покрытиях;
- высокой производительностью систем нанесения покрытий с использованием зарядки коронным разрядом;
- относительно низкой чувствительностью к влажности окружающего воздуха;
- надежностью оборудования и низкими затратами на техническое обслуживание и ремонт.

Обычные системы зарядки коронным разрядом имеют также свои недостатки, которые обусловлены сильным электрическим полем между распылителем и деталью. Так в некоторых случаях сильное электрическое поле может затруднить нанесение покрытия в углах и в местах глубоких выемок. Неправильный выбор электростатических параметров распылителя и расстояния от распылителя до детали может вызвать обратную ионизацию и ухудшить качество покрытия.

1.1 Краткие сведения о защитных порошковых полимерных красках

При разработке новых материалов для покрытий необходимо руководствоваться такими требованиями как: получение покрытий минимальной толщины при сохранении высоких эксплуатационных характеристик; снижение температуры формирования защитного слоя; придание покрытию специфических функциональных свойств [17, 26].

Важное значение при выборе покрытия имеют условия эксплуатации аппаратуры и оборудования (постоянно или периодически воздействуют агрессивные среды, эксплуатируется ли оборудование внутри цеховых

помещений или на открытом воздухе, какие агрессивные факторы преобладают и т.п.) [27].

Большие возможности в области направленного регулирования свойств покрытия открываются при использовании систем, состоящих из двух или более полимеров. Распространенным приемом в технологии покрытий является создание промежуточных адгезионно прочных слоев на основе полимеров, совместимым с материалом основного слоя [28]. Примером применения такой технологии являются бинарные полимерные составы: модификации поликарбоната и полиарилатов эластомерами [29], полиолефинов полиамидами [30], поливинилбутирала полиолефинами [31] и полиамидами [32], полиамидов полиолефинами и пентапластом [32]. Бинарные полимерные составы позволяют получать покрытия со свойствами, существенно отличающимися от свойств покрытий, формируемых из отдельных полимеров.

Для получения полимерных покрытий с высокими защитными свойствами используется порошковая окраска. Порошковая краска – это многокомпонентная система, которая является твердой и дисперсной [23].

Процесс получения порошковых красок включает в себя несколько стадий. Полимеры и олигомеры предварительно измельчают. Все исходные компоненты дозируются и предварительно смешиваются в высокоскоростных смесителях; затем происходит их гомогенизация в расплаве. Полученный материал охлаждается в специальных устройствах барабанного или ленточного типа, проходит грубое и тонкое измельчение. Готовую порошковую композицию классифицируют по размерам частиц (допустимый размер частиц находится в пределах 5-350 мкм) и фасуют [33].

Основные компоненты порошковых красок – вещества, которые являются пленкообразующими, содержащими в себе стабилизаторы, отвердители, пластификаторы, поверхностно-активные вещества и др.

Пленкообразователями для порошковых красок могут служить такие полимеры, как поливинилбутираль, поливинилхлорид, полиакрилаты, полиамиды, полиэтилен, фторопласты, пентапласт, эфиры целлюлозы, полиуретаны [18, 34].

Основные характеристики некоторых полимеров представлены в работе А.И. Рейбмана [27] и приведены ниже.

Поливинилбутираль получается при взаимодействии поливинилового спирта с масляным альдегидом. Поливинилбутираль с добавкой феноло- и меламиноформальдегидных смол используют для получения необратимых покрытий, стойких к воздействию минеральных масел, бензина, воды и пара. В условиях химических и других производств возможно применение красно-коричневой эмали ВЛ-515, представляющую собой раствор поливинилбутираля и крезолформальдегидной смолы в смеси органических растворителей с добавлением красного железистоокисного пигмента и талька. Эмаль обладает хорошей адгезией к черным металлам, алюминию и его сплавам, меди, латуни, стеклу, гетинаксу, бетону.

Лакокрасочные материалы на основе сополимеров винилхлорида с винилиденхлоридом, винилацетатом, винилбутиратом, метилметакрилатом и другими мономерами обладают хорошей эластичностью, достаточной химической стойкостью и удовлетворительными адгезионными свойствами.

В результате полимеризации акриловой, метакриловой кислот или их производных (эфиров, нитрилов, амидов и др.) получают полиакрилаты. Наибольшее значение для лакокрасочной промышленности имеют полимеры и сополимеры эфиров метакриловой кислоты – полиметилметакрилат, полибутилметакрилат и др. Лакокрасочные покрытия на основе акриловых сополимеров отличаются высокой атмосферо- и светостойкостью. Эти покрытия эластичны, стойки к удару, имеют хорошую адгезию к окрашиваемой поверхности.

Для пентапласта характерно большое содержание связанного хлора, высокие значения молекулярной массы и степени кристалличности, сплошности упаковки молекул. Поэтому покрытия, получаемые из пентапласта, обладают очень высокой химической стойкостью, водостойкостью, негорючестью, хорошими механическими и диэлектрическими показателями, высокой теплостойкостью. Покрытия на основе пентапласта могут быть применены при

защите внутренних частей трубопроводов и других изделий, эксплуатируемых в условиях химических и других производств. Они не только обеспечивают надежную защиту изделий от коррозии и воздействия различных агрессивных сред, но в ряде случаев позволяют также заменить нержавеющей сталь углеродистой, отказаться от горячего цинкования и пр.

Полиуретаны – продукты взаимодействия полиспиртов с полиизоцианатами. Покрытия на основе полиуретанов, обладая очень хорошей адгезией к металлическим и неметаллическим поверхностям, характеризуются высокими механическими показателями: стойкостью к истиранию, твердостью и эластичностью. Они отличаются атмосферостойкостью, стойкостью к маслам и растворителям, водостойкостью, газонепроницаемостью и высокими диэлектрическими свойствами.

Изделия авиационной техники могут быть защищены с помощью следующих систем лакокрасочных покрытий: перхлорвиниловой, акриловой, эпоксидной, полиуретановой и лаковой [35].

Перхлорвиниловые покрытия имеют хорошую адгезию к ряду грунтовок. На наружные поверхности самолетов и вертолетов их наносят главным образом на акриловые грунтовки. Это объясняется тем, что эти грунтовки быстро высыхают, имеют хорошую адгезию почти ко всем металлам и сплавам, применяемым в авиационных конструкциях. В системе с перхлорвиниловыми эмалями акриловые грунтовки обладают высокими защитными свойствами, благодаря чему они применяются не только для защиты лакированных обшивочных листов, но и прессованных панелей и других деталей, выходящих на наружную поверхность из нелакированных и литейных сплавов, обладающих меньшей коррозионной стойкостью, чем лакированные обшивочные листы. Эти системы также наносятся на детали из различных марок алюминиевых сплавов, сваренных точечной, роликовой или другими видами сварки, с последующим химическим оксидированием.

Акриловая система применяется для окраски внешних поверхностей пассажирских самолетов различных конструкций. Она состоит из двух слоев

акриловой грунтовки и двух слоев акриловой эмали. Эмали быстро высыхают и образуют покрытие с красивым внешним видом и хорошей атмосферо- и светостойкостью. В системе с акриловыми грунтовками они обладают хорошими защитными свойствами в отношении лакированных и нелакированных, а также литейных алюминиевых сплавов, предварительно анодированных или химически оксидированных.

Эпоксидная система покрытий обладает высокими защитными свойствами, стойка к воздействию ядохимикатов, бензина, керосина и минеральных масел. Покрытия отличаются большой механической прочностью, они легко поддаются очистке от загрязнений. Порядок нанесения отдельных слоев грунтовки и эмали такой же, как и для перхлорвиниловой системы.

Лакокрасочные покрытия на основе полиуретанов позволяют противостоять высотному ультрафиолетовому облучению и широко применяются для покрытия изделий авиационной техники. Как отмечается в работе В.Г. Железняк [36] основной задачей при разработке лакокрасочных материалов является защита деталей и узлов конструкций авиационной техники от разрушающего воздействия окружающей среды. Поверхность деталей из металлических сплавов и полимерных композитных материалов подвергается сложному воздействию многих факторов. Среди них: широкий диапазон температурных перепадов воздушной атмосферы, интенсивная солнечная радиация, повышенная доля ультрафиолета, эрозионный износ, неизбежное воздействие при эксплуатации горюче смазочных веществ и других агрессивных жидкостей. Кроме того, ЛКП несет декоративные функции, а для изделия военного назначения – функции защиты от специальных факторов и снижения заметности в различных диапазонах длин волн. В настоящее время на изделиях авиационной техники применяются десятки и даже сотни различных функциональных лакокрасочных материалов на полимерной основе.

В послевоенный период в ФГУП «ВИАМ» [37] были синтезированы первые акриловые пленкообразователи (смолы БМК-5 (полибутилметакрилат), АС (сополимер бутилметакрилата и амида метакриловой кислоты), АСН (сополимер

бутилметарилата, амида метакриловой кислоты и нитрила акриловой кислоты) и другие) на основе которых были созданы прозрачные лаки (АК-113, АС-16 и другие) холодной сушки с термостойкостью до 150 °С, предназначенные для окраски внешней поверхности самолетов с обшивками из алюминиевых сплавов.

В работе [38] исследованы свойства систем лакокрасочных покрытий, применяемых для внешней окраски изделий авиационной техники из металлических сплавов и полимерных композиционных материалов, на основе фторполиуретановой эмали ВЭ-69 в сравнении с отечественной эмалью УР-1161 и импортным аналогом С21/100 фирмы Акзонобель после факторов старения. Установлено, что после воздействия факторов старения система лакокрасочных покрытий на основе эмали ВЭ-69 обладают высокой стойкостью к действию агрессивных жидкостей, к УФ излучению, высокими адгезионными, физико-механическими и декоративными свойствами.

Покрытия из фторполиуретановой эмали ВЭ-69 и акрилстирольной эмали АС-1115 подвергались натурным испытаниям на биологические повреждения и обрастание в условиях умеренного холодного и теплого влажного климата Европейской части России [39] и натурным климатическим испытаниям в различных зонах тропического и умеренного климата [40]. В работе Н.П. Андреева и др. было показано, что физико-механические характеристики экспонируемых покрытий, в том числе адгезионные свойства, за прошедший период экспозиции в рассмотренных климатических зонах остались без изменений, а наибольшие изменения цветовых характеристик и падения глянца покрытия АС-1115 до 80% наблюдается на образцах покрытий в условиях тропического климата.

Известно, что свойства полимерных покрытий определяются не только составом и химической природой полимерной матрицы, но также структурой и природой вводимых в полимер наполнителей [41]. Наполненные полимерные композиции представляют собой гетерогенную систему с высокоразвитой поверхностью раздела фаз. Одним из основных процессов, определяющих свойства наполненных систем, является адсорбция полимеров на поверхности

высокодисперсного наполнителя [42-44]. Для достижения таких важнейших характеристик покрытий, как износостойкость и твердость, в полимерные композиции вводят различные виды мелкодисперсных наполнителей, таких как порошки алюминия, нитрида бора, карбида кремния, корунда, а также керамические сферы, а в качестве полимерной матрицы может использоваться эпоксидный олигомер [45]. Повышение вышеуказанных характеристик при создании адгезионно прочных износостойких покрытий может быть достигнуто оптимизацией состава полимерного пленкообразователя, отвечающего заданным требованиям по адгезионным и физико-механическим характеристикам (применение модифицированных эпоксидных и полиуретановых композиций), а также использованием наполнителей с высокой твердостью – в частности, казикристаллов, для повышения твердости, прочности и износостойкости покрытий [46-47].

В современной авиационной технике для защиты топливных кессон баков широкое применение находят водостойкие и топливостойкие покрытия. Под водостойкостью и топливостойкостью принято понимать способность полимерного покрытия противостоять и сохранять свои свойства при длительном воздействии воды или жидкого топлива [48-50]. В работе [51] исследовано влияние содержания и времени пластикации карбоксилатного бутадиен нитрильного каучука на свойства топливостойкого эпоксидного каучукового покрытия и установлено, что содержание каучука и способ его подготовки влияют на важнейшие показатели для топливостойких покрытий.

В работе [52] были рассмотрены особенности защиты поверхности деталей авиационной промышленности изготовленных из полимерных композиционных материалов. Было отмечено, что одним из материалов, позволяющих снизить трудоемкость при подготовке деталей из полимерных композиционных материалов к окраске и обеспечить устойчивую защиту поверхности конструкций, являются поверхностные пленки. В то время как в конструкционных клеях основными необходимыми свойствами являются прочность при растяжении и сдвиге, для поверхностных пленок важны текучесть,

драпируемость, время гелеобразования, а также циклическая прочность и легкость окрашивания. Большинство полимерных пленок предпочтительнее перерабатывать автоклавным способом, но некоторые предназначены и для вакуумного формования. Поверхностные пленки обычно совместимы с широким диапазоном связующих, включая эпоксидные, фенольные и полиэфирные. Таким образом, применение полимерных поверхностных пленок целесообразно как с технической, так и с экономической стороны.

На данный момент существует большое разнообразие лакокрасочных материалов для защиты авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов [53-54]. Такие покрытия должны обеспечивать прочную связь покрытия с поверхностью пластика, возможность сушки при температуре, не вызывающей структурных изменений и деструкции пластика, стойкость покрытия к условиям эксплуатации. Для обеспечения прочной адгезии покрытия к пластику поверхность последнего подготавливают перед окраской, в частности удаляют слой разделительной смазки. На адгезию покрытия к полимеру большое влияние оказывает растворитель, входящий в состав лакокрасочного материала, так как он способен проникать в пластик и вызывать не только его набухание, но и растворение. Прочность связи лакокрасочного покрытия с полимером в основном обеспечивается за счет сил межмолекулярного взаимодействия. Для обеспечения адгезии поверхность пластиков подвергается химической или механической обработке с целью повышения ее шероховатости.

Полимерные композиционные материалы в последние годы все чаще используют для изготовления основных силовых элементов и агрегатов воздушного судна. Повреждения в таких деталях представляют серьезную опасность. В отличие от металлов, где энергия ударов поглощается за счет пластического деформирования, а прочность практически сохраняется, в полимерных композиционных материалах, армированных волокнистым наполнителем, в момент индентирования при относительно низком уровне энергии внешнего воздействия происходит хрупкое разрушение матрицы и волокон. При эксплуатации авиаконструкций из армированных полимерных

композиционных материалов наиболее распространены случайные ударные повреждения, которые могут привести к возникновению в нем, так называемых едва заметных ударных повреждений которые нередко вызывают значительное ухудшение локальных прочностных свойств [55]. Поэтому необходимы простые, эффективные и надежные в эксплуатации методы визуального осмотра и выявления поврежденных областей воздушного судна, не требующие больших финансовых затрат, а также высокой или специальной квалификации обслуживающего персонала. Востребованными для этих целей могут быть технологии, основанные на применении индикаторных ударочувствительных полимерных покрытий. Подробный обзор о применении таких покрытий для обнаружения ударных повреждений конструкций, как за рубежом, так и в России представлен в работе [56]. Индикаторные вещества, содержащиеся в ударочувствительных полимерных покрытиях, помогают визуализировать и контролировать деформации поверхности конструкций из полимерных композиционных материалов от ударных воздействий, обнаруживать механические повреждения и проводить необходимый ремонт прежде, чем ситуация станет критической.

1.2 Косвенные методы определения механических свойств покрытий

В настоящее время существует несколько методов по определению механических характеристик для лакокрасочных покрытий. Они описаны в работах [11, 57-61]. Тем не менее, ни один из этих методов не дает надежных оценок механических характеристик покрытия. В большинстве случаев использование указанных методов дает лишь качественное представление о механических свойствах исследуемых покрытий. Так при определении эластичности по методам [57] итогом исследования является минимальный диаметр стержня, вокруг которого образец с покрытием возможно изогнуть без растрескивания нанесенного лакокрасочного покрытия. Появление трещин при этом определяется визуально с помощью лупы. Схожий метод представлен в

работе [58]. Перехода от диаметра стержня или конуса к определенным значениям модуля упругости, коэффициента Пуассона не существует.

Эластичность и устойчивость к деформации – одни из ключевых физических характеристик в современной индустрии покрытий. В широкой практике применяются три тестовые процедуры, которые определяют поведение покрытия под воздействием разных видов деформации – устойчивость к растрескиванию и/или отслаиванию. Это тесты на прочность при ударе, тест на прочность при изгибе и тест на эластичность при вдавливании.

Метод испытания на удар [59] также не позволяет определить значений механических характеристик. Прочность при ударе показывает способность покрытия противостоять быстрой деформации. Удар со стороны покрытия расценивается как прямой, со стороны подложки – как обратный удар. Для оценки ударопрочности покрытий могут использоваться оба этих способа. Испытание заключается в том, что металлическую пластину с покрытием помещают окрашенной или обратной стороной вверх под свободно падающий груз, затем осматривают повреждение, вызванное деформацией. В зависимости от веса груза-ударника и высоты, с которой он падает, будет происходить либо разрушение покрытия, либо его нарушение (разрыв, растрескивание, отслоение). Значение ударопрочности является по сути величиной силы максимального удара, который не нарушил покрытие при определенной толщине пленки. При испытании на ударопрочность важными факторами являются толщина и эластичность подложки. Они должны контролироваться для получения надежных результатов. Непосредственно связана с ударопрочностью толщина красочной пленки – чем толще покрытие, тем меньше его устойчивость к удару. Степень повреждения, нанесенного покрытию ударом, должна рассматриваться в совокупности с другими свойствами покрытия. Многие покрытия, обладающие высшей степенью стойкости к внешним воздействиям или к воздействию химических веществ, не имеют высоких значений ударопрочности.

Прибор, который получил широкое признание в качестве инструмента, измеряющего устойчивость к удару многих видов покрытий, представляет собой

направляющую трубу, укрепленную вертикально над станиной-основанием с наковальней. На трубе имеется боковая прорезь, которая направляет скользящий внутри трубы груз-боек. Снаружи, вдоль прорези, на трубу нанесена шкала для установки груза – металлического цилиндра со сферическим наконечником-бойком – на требуемую высоту нанесения удара. В некоторых моделях груз и боек разделены – груз в этом случае падает на боек, а тот передает удар пластине с покрытием. Наковальня представляет собой матрицу с отверстием определенного диаметра. Схема действий проста: пластину с покрытием кладут на наковальню, груз, держа его за прикрепленную ручку, поднимают по трубе на нужную высоту и отпускают. Такие тестеры ударопрочности используются в заводских лабораториях для входного контроля покрытий, в процессе производства, а также в полевых условиях.

Чаще всего эластичность лакокрасочного покрытия контролируется двумя методами, первый из которых – испытание на изгиб, определяет способность покрытия противостоять изгибу подложки. Гибкость покрытия проверяют следующим образом: окрашенная металлическая пластина прямоугольной формы изгибается на цилиндрическом или коническом стержне, после чего проводится исследование покрытия на предмет трещин, изменения цвета, разрыва и отслаивания от подложки. Если используются цилиндрические стержни, то требуется комплект стержней разного диаметра, конический стержень позволяет одновременно тестировать покрытие на разных диаметрах, и прибор комплектуется одним стержнем. Изгибание на коническом стержне подвергает покрытие различной степени растяжения, позволяя определить, помимо собственно эластичности, его адгезионные характеристики. Цель теста на обоих видах стержней – определить минимальный диаметр, на котором не происходит растрескивания или отслаивания одно- или многослойной красочной пленки определенной толщины. Этот диаметр в миллиметрах принимается за результат теста. Для испытания рекомендуется применять тестовые пластины из полированной жести толщиной 0,25–0,32 мм, или алюминия [62-63] толщиной 0,25–0,3 мм, но допускаются и пластины из другого материала, если это указано в

нормативно-технической документации на испытуемый ЛКМ. В документации также должны быть указаны: способ нанесения ЛКМ на тестовую пластину, толщина пленки, количество слоев, условия и время высыхания, выдержка пленки перед испытанием.

Простейший прибор для определения эластичности при изгибе на цилиндрическом стержне представляет собой станину из двух боковых стоек, скрепленных стяжками. Верхняя часть стоек снабжена углублениями для установки испытательных стержней. В числе таких приборов – модель «Изгиб» производства «Градиент-Техно», британская Elcometer 1500, Cylindrical Mandrel от ВУК-Gardner. У Elcometer 1500 и Cylindrical Mandrel нижняя часть станины сконструирована как подставка для не используемых в данный момент стержней – в стойках сделаны отверстия соответствующих диаметров. Аналогичный российский прибор «Константа ШГ2» состоит из П-образного основания, на котором закреплен стержень, сделанный из нескольких последовательно соединенных стержней разного диаметра. Модель прибора «Константа И1» – это две пятиугольные пластины, между которыми закреплены по кругу стержни. Сами пластины разной толщины, одна из граней каждой пластины закруглена и может также использоваться для тестирования.

Определение прочности при растяжении регламентировано в [57]. Однако, как и в предыдущих случаях, такое исследование не дает численных значений механических характеристик покрытия. В данном методе используется прибор типа 2068-МТВ-10 или прибор-пресс Эриксона и лупа ЛИ-4-10 по ГОСТ 25706. Схема прибора-пресса Эриксона представлена на рисунке 1.1.

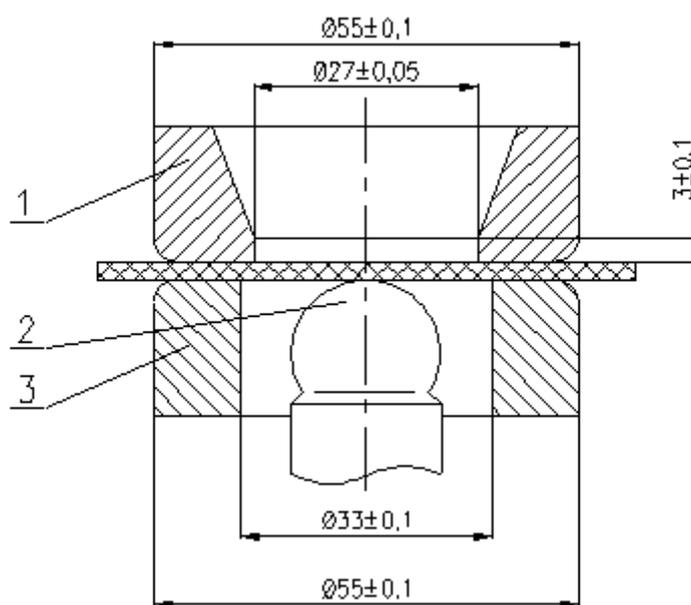


рисунок 1.1 – Прибор-пресс Эриксона,

где 1 – матрица, 2 – пуансон, 3 – прижимное кольцо.

Образец устанавливают в пресс окрашенной стороной к матрице и плотно зажимают его между матрицей и прижимным кольцом. Головка пуансона должна находиться в нулевом положении, т.е. соприкоснуться с испытываемым образцом, и быть удалена не менее чем на 35 мм от поперечных кромок пластины относительно оси пуансона. Прочность покрытия при растяжении определяется глубиной вдавливания пуансона в пластину, выраженной в миллиметрах.

Следует обратить внимание на эффективный метод исследования механических характеристик пленок и мембран, основанный как на экспериментальных данных, так и на теоретических соотношениях, полученных из нелинейной теории тонких оболочек, теории упругости и пластичности [64]. В таком методе используется экспериментальная установка ДМ-1, представленная на рисунке 1.2, предназначенная для испытания тонкостенных круглых образцов, на одну поверхность которых воздействует какая-либо среда, а на другую – равномерно распределенное поверхностное давление. Установка содержит нагрузочный резервуар 1 с фланцем 2, на посадочную площадку которого устанавливается испытуемый образец 3', герметично закрывающий полость резервуара 1. Образец 3' закрепляется по контуру крепежными элементами 6 при помощи ответного фланца 4. На этот фланец установлен патрубок 5 для заливки

рабочей среды 17. К резервуару 1 подведена магистраль 7 с вентилем 8 от источника давления 9 (например, сжатого воздуха или компрессора) для оказания одностороннего давления на образце 3'. Клапан 10 служит для стабилизации давления. К резервуару 1 через трубки 11 подсоединено манометр 12 для измерения давления. Установка снабжена кронштейном 15 с индикатор часового типа 14, закрепленным на платформе 13, для измерения геометрических параметров формы деформированного образца 3. Резервуар 1 имеет вентиль 16 для снятия давления перед удалением образца из устройства.

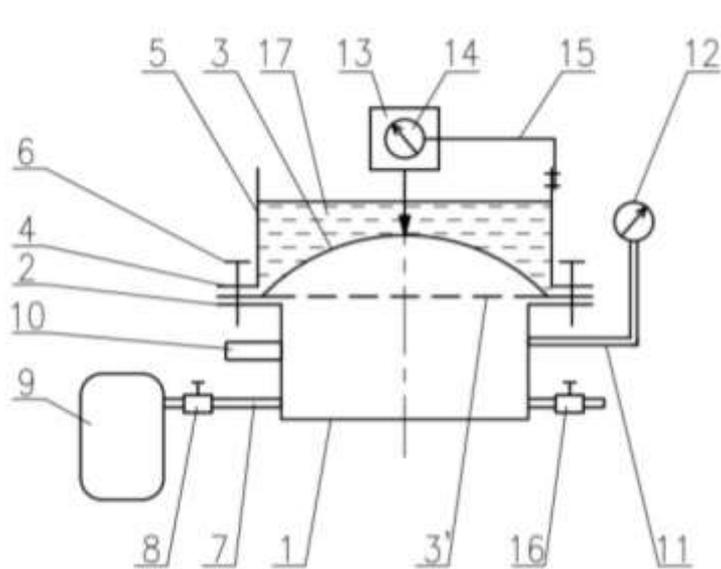


рисунок 1.2 – Установка для испытаний тонкостенных круглых образцов

Испытания проводят следующим образом. Исследуемый образец 3' закрепляют на фланцах 2 и 4 нагрузочного резервуара. При необходимости в полость патрубка 5 заливают рабочую среду 17. При этом уровень жидкости устанавливают на 0,03-0,05 м выше образца, чтобы он полностью утонул в ней. Поверхностную нагрузку на исследуемый образец создают путем подачи давления в резервуар 1 из источника давления 9. Образец при этом прогибается, образуя купол, высота которого фиксируется, например индикатором 14. Периодически через заданный определенный интервал времени замеряют

геометрические параметры образца, например прогиб и толщину в вершине образуемого купола.

При теоретической обработке экспериментальных результатов используются, в частности, соотношения для тонких пластин, гибких упругих мембран при больших изменениях кривизны и пластических деформациях [46]. Например, для упругой тонкой пластины толщиной h в случае среднего изгиба модуль упругости можно определять по формуле (1.1) [46]:

$$E = \frac{3(1-\nu^2)pa^4}{16hN(h^2 + 0,488H^2)}, \quad (1.1)$$

где ν – коэффициент Пуассона; a – радиус рабочей части образца; p – давление в резервуаре; H – прогиб пласти; h – толщина пластины.

Для определения механических характеристик покрытия, включая нанопокртия, полученных в системе «покрытие-подложка» используется следующий подход [46]: отдельно исследуются свойства подложки и пакета «подложка-покрытие» и определяются механические характеристики покрытия. Модуль упругости покрытия при таком подходе определяется по следующей формуле (1.2), следующей из условия совместности деформаций покрытия и подложки при одноосном напряженном состоянии [46]:

$$E_{\text{покр}} = \frac{E_c(h_{\text{покр}} + h_{\text{подл}}) - E_{\text{подл}}h_{\text{подл}}}{h_{\text{покр}}}. \quad (1.2)$$

1.3 Растяжение свободных пленок

Количественную оценку упругих свойств покрытий позволяет получить метод, основанный на испытаниях на растяжение тонких пленок ЛКМ. Этот метод имеет очевидные преимущества по сравнению с качественными методами оценки свойств покрытий, но в то же время ему присущи и серьезные недостатки:

- приготовление тонких пленок покрытий – это сложный процесс;
- установка образцов пленки в захватах разрывной машины сопряжена с необходимостью использования дополнительных приспособлений [57];

– этот метод не пригоден для порошковых покрытий, которые наносятся при температурах 100-120°C;

– свойства тонких пленок ЛКМ и покрытий, наносимых на металлические поверхности, могут существенно отличаться.

По [57] предусматривается 2 метода получения свободных пленок. Сущность первого метода заключается в отделении гибкой окрашиваемой поверхности от высохшего слоя лакокрасочного материала. В качестве гибкой окрашиваемой поверхности применяют полиэтилентерефталатную пленку и алюминиевую фольгу. Способ занесения лакокрасочного материала на подготовленные окрашиваемые поверхности, условия сушки, толщина пленки должны соответствовать нормативно-технической документации на испытуемый материал. Для получения свободных пленок на полиэтилентерефталатной пленке последнюю нарезают полосками размером 90×110 мм (или других размеров), которые накладывают на стеклянные или металлические пластины так, чтобы более длинные края пластин оставались свободными (не менее 5 мм каждый). Края полиэтилентерефталатной пленки на пластине закрепляют двумя полосками липкой ленты размером 10×90 мм. После выдержки пленки лакокрасочного материала гибкую окрашиваемую поверхность отделяют от стеклянной пластины. Для этого гибкую окрашиваемую поверхность с пленкой с помощью металлической линейки и лезвия бритвы нарезают на полоски требуемой ширины. При помощи лезвия бритвы или скальпеля окрашиваемую поверхность отслаивают от пленки лакокрасочного материала на расстоянии 5 мм от края. Второй метод состоит в отделении высохшего слоя лакокрасочного материала от жестких окрашиваемых поверхностей, в качестве которых применяют стекло, фторопласт и другие материалы. Высохший слой лакокрасочного материала отслаивают от окрашиваемой поверхности с помощью лезвия бритвы. Толщину полученной свободной пленки измеряют микрометром. За результат принимают среднее арифметическое трех измерений в разных точках. Допускаемое отклонение толщины пленки в каждой точке от номинального значения – не более 5 %.

Захват пленки осуществляется с помощью пневмозажимов. Для предотвращения разрыва пленки в зажимах используются специальные резиновые подкладки.

Тем не менее, значения механических характеристик пленок, полученных таким методом, могут существенно отличаться от свойств покрытий, нанесенных непосредственно на металлические поверхности [57].

Это связано с адгезией покрытия к подложке, наличием дефектов нанесения покрытия на подложку. Необходимо также отметить, что податливость лакокрасочных покрытий зависит от многих факторов [57]. К основным из них можно отнести: время с момента нанесения покрытия, влажность, температура, скорость деформации и др. С увеличением влажности, температуры и скорости деформации модуль упругости покрытия уменьшается. Поэтому в работе [57] регламентирована температура проведения исследования $20\pm 2^\circ\text{C}$ и относительная влажность воздуха $65\pm 5\%$.

Растяжение свободных пленок распространенный метод для определения механических характеристик лакокрасочных покрытий, в частности для жидких красок, однако получение свободных пленок для порошковых красок в настоящее время не представляется возможным. Это объясняется хорошей адгезией краски к подложке, в связи с чем, невозможностью отделения пленки от подложки без механических повреждений.

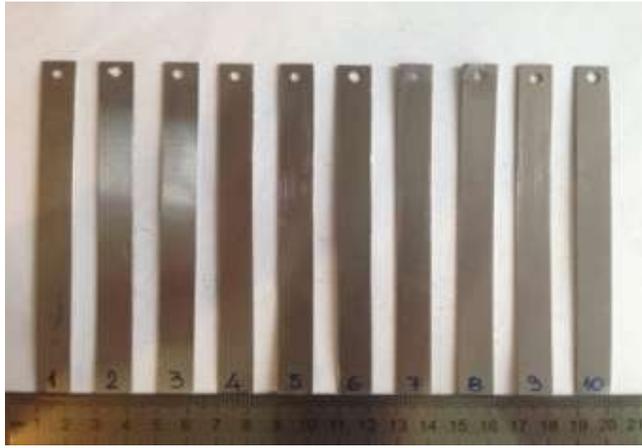
Из представленного краткого обзора существующих испытаний ЛКМ можно сделать вывод, что ни один из разработанных методов не позволяет получить определенные оценки упругих характеристик покрытий. С другой стороны, знание упругих свойств покрытий дает возможность моделировать их поведение в различных условиях эксплуатации и оценивать долговечность и износостойкость, а также оценивать влияние покрытий на механическое поведение особотонкостенных изделий.

1.4 Методика изготовления образцов стальных пластин с покрытиями на эпоксидно-полиэфирной основе

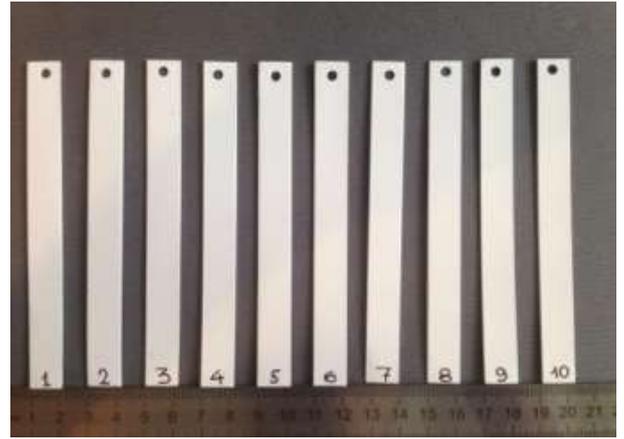
Все испытания проводились на образцах в виде пластин длиной 120-240 мм, шириной 12-24 мм и толщиной 0.7 мм, 0.9 мм, 1.2 мм, и 1.5 мм (рисунок 1.3). Материал пластин – листовая прокатная сталь марки 08ПС – нелегированная конструкционная сталь с малым содержанием углерода. Все образцы вырезались из стальных листов в направлении проката. Края образцов зачищались и обрабатывались для удаления неровностей.

Были изготовлены партии образцы без покрытий и образцы с порошковыми покрытиями на эпоксидно-полиэфирной основе марки EUROPOLVERI (RAL 9010, Италия). Нанесение покрытий проводилось электростатическим способом в покрасочной камере фирмы Gema (Швейцария). Перед нанесением покрытий поверхность стали подвергалась обезжириванию для удаления с поверхности органических загрязнений и фосфатированию для улучшения адгезии покрытий и замедления распространения подпленочной коррозии. Сушка осуществлялась при температуре 120 °С не более 5 минут. Полимеризация напыленного слоя проводилась в термокамере при температуре 150 °С в течение 30 мин. Образцы охлаждались на воздухе нескольких часов. Образцы без покрытий также подвергались указанной термообработке, для сравнения эффектов влияния покрытий. Каждая партия содержала не менее 5 однотипных образцов, отличающихся размерами пластин или толщиной стальной подложки.

Толщина покрытий на образцах составляла 110 мкм с разбросом значений ± 30 мкм. Измерение толщины покрытий проводилось с использованием электронного толщиномера QuaNix 7500 (Германия). Качество покрытий проверялось визуально. При наличии дефектов на поверхности покрытий (трещин, отслоений, значительных неровностей) образцы отбраковывались. Характерный вид микроснимках шлифа стального образца с покрытием показан на рисунке 1.4.



(a)



(б)



(в)



(г)

рисунок 1.3 – Партии образцов в виде стальных пластин без покрытий (а, в)
и с порошковым эпоксидно-полиэфирным покрытием марки EUROPOLVERI,
RAL 9010 (б, г)

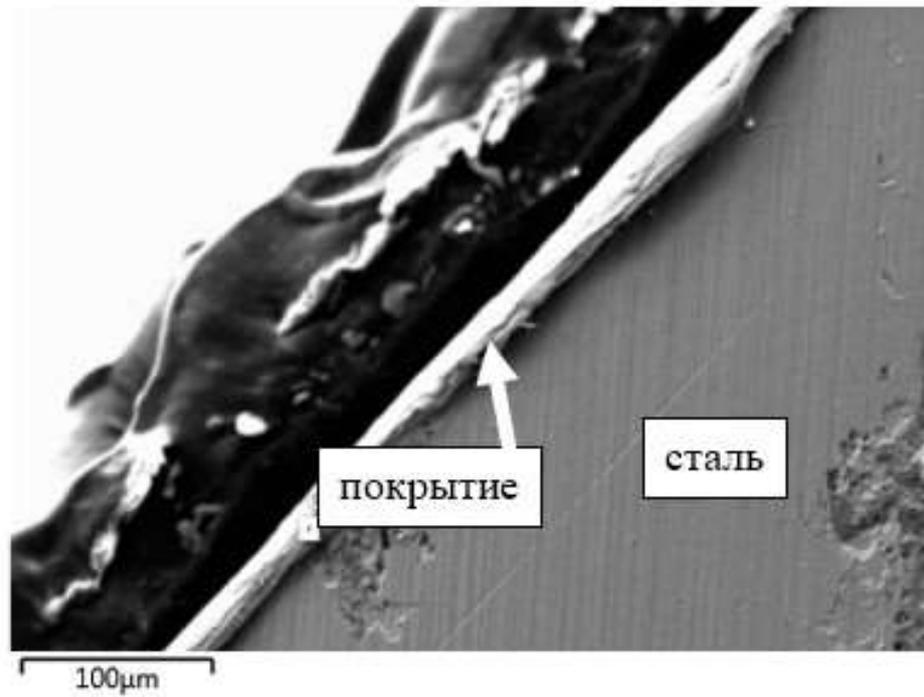


рисунок 1.4 – Микроснимок эпоксидно-полиэфирного покрытия на стальной подложке (РЭМ, увеличение x200)

2 МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЯ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН С ПОКРЫТИЯМИ НА ЭПОКСИДНО-ПОЛИЭФИРНОЙ ОСНОВЕ МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ

В последние годы для определения твердости материалов все шире используется метод непрерывного индентирования, достаточно полно разработанный в 1960 – 1970 г., где он был более известен как метод кинетической твердости [64-67]. Сущность метода кинетической твердости заключается в том, что в исследуемый материал внедряется индентор и при этом регистрируют два параметра: нагрузку и глубину внедрения индентора. Твердость определяют, как частное от деления нагрузки на площадь поверхности отпечатка или его проекции. В настоящее время стандартами Евросоюза также предусмотрено кинетическое индентирование для определения твердости, при этом придерживаются следующих уровней определения твердости [57-58]:

1. макроуровень: $2 \text{ Н} < P < 30000 \text{ Н}$;
2. микроуровень: $P < 2 \text{ Н}$, $h > 200 \text{ нм}$;
3. наноуровень: $h < 200 \text{ нм}$;

где P – нагрузка, h – глубина индентирования.

Вполне очевидно, что 1-ый уровень наиболее соответствует общепринятому термину макротвердость, 2-ой уровень – микротвердость, и 3-ий уровень – нанотвердость.

Почти все элементы аналитической модели, применяемой в методе индентирования, были разработаны исследователями из Московского института металлургии им. Байкова в 70-е годы XX века. Основными принципами, модели являются [68]:

- деформация при разгрузке полностью упругая;
- соотношение между жёсткостью образца и индентора может быть получено следующим образом:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_s^2}{E_s}, \quad (2.1)$$

где ν_s – коэффициент Пуассона образца; ν_i – коэффициент Пуассона индентора (0,07 для алмазного индентора [69]); E_s – модуль упругости материала покрытия; E_i – модуль упругости индентора (1141 ГПа для алмазного индентора [69]); E_r – приведённый модуль;

– контакт может быть смоделирован, используя аналитическую модель, описывающую контакт между жёстким индетором определённой формы с однородной изотропной упругой поверхностью:

$$S = \frac{2\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}} E_r, \quad (2.2)$$

где S – контактная жёсткость, A – площадь контакта.

Данное соотношение было представлено Шеддонном, а позже Оливер, Фарр и Бротцен показали, что данное уравнение работает для инденторов различной геометрии и формы.

Суть метода заключается в получении зависимости нагрузка-деформация при внедрении физически и геометрически аттестованного индентора в образец. Прикладываемая сила составляет несколько миллиньютонов с разрешением в несколько наноьютонов, деформации составляют несколько нанометров (десятков нанометров) с разрешением до 0,04 нм, отсюда термин – наноиндентирование.

Дополнительные возможности эксперимента:

- сканирование – движение образца при нагрузке (скратч-тест);
- ударное воздействие – осцилляция образца при постоянной нагрузке.

Наноиндентирование – это метод, позволяющий определять механические и усталостные свойства различных плёнок, покрытий и материалов на наноуровне. Испытания при очень малых деформациях и сопоставление полученных данных с микро- и макро- экспериментами позволяют сделать вывод о связи наноструктуры материалов и их свойств на макроуровне.

В настоящей работе наноиндентирование применяется для прямого определения модуля упругости исследуемых полимерных покрытий на стальных

подложках. Также проводится сопоставление различных методик индентирования покрытий на результаты измерения. Заметим, что метод индентирования позволяет достаточно точно определить даже объемные (а не только поверхностные) свойства материала, если использовать достаточно большое усилие индентирования и если материал является однородным вблизи поверхности. Характерное значение модуля упругости эпоксидно-полиэфирных смол составляет 2,5-3,5 ГПа. Вероятно, что упругие свойства таких покрытия из испытаний индентированием оценить достаточно сложно, из-за нелинейности определяющих соотношений, которые характерны для данного типа материалов. В результате погрешность измерений может возникать не только из-за вариации свойств экспериментальных образцов или из-за погрешности измерительного оборудования, но также вследствие существенного увеличения погрешности применяемой формулы Оливера-Фарра (2.1).

2.1 Методика проведения и обработки эксперимента

Исследования проводились на образцах, представляющих собой стальные пластины прямоугольной формы 12x120 мм с нанесенными покрытиями. Для экспериментов использовался измерительный комплекс NanoTest 600 (Англия), изображенная на рисунок 2.1, с индентором Берковича и со сферическим индентором. Основные характеристики приведены в таблице 2.1.

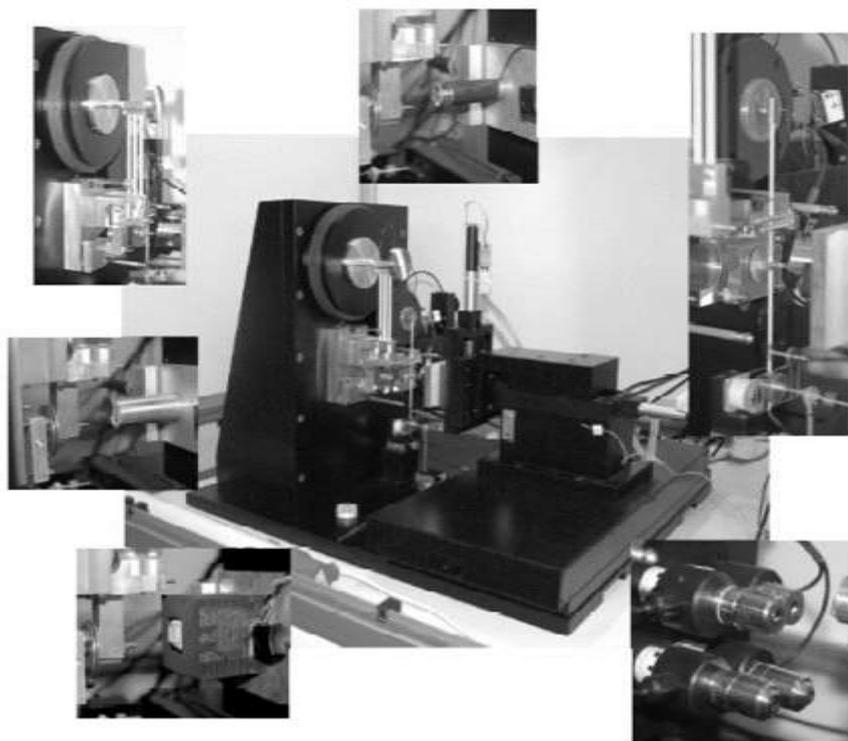


рисунок 2.1 – Экспериментальная установка NanoTest 600

Таблица 2.1 – Основные характеристики измерительного комплекса NanoTest 600

Технические характеристики	Режим испытаний	
	Нанотест	Микротест
Сила нагружения при испытании	0,1 – 500 мН	0,1 – 20 Н
Разрешение по нагрузке	<30 нН	60 мкН
Максимальная глубина	50 мкм	100 мкм
Теоретическое разрешение по глубине	0,001 нм	–
Температурный диапазон	до 750° С	до 500° С
Определение механических свойств плёнок толщиной	до 20 нм	–
Инденторы	Викерса, Берковича, Сферический, Кубический 90°	Викерса, Берковича, Сферический
Размер образца	5 x 10 мм	
Микроскоп	Увеличение 100х, 250х, 500х, 1250х	

Рабочим органом комплекса NanoTest 600 является маятник, который вращается на шарнире, свободном от трения. Маятник является лёгким и достаточно жёстким при максимально прикладываемой силе (500 мН). Стержень маятника выполнен из керамики, имеет цилиндрическую форму, на конце маятника установлена индукционная катушка. Под действием электрического тока катушка движется по направлению к магниту, задавая закон движения алмазного индентора к образцу. Перемещение индентора измеряется емкостным датчиком. Глубина проникновения алмазного индентора в образец задается с погрешностью 0,04 нм.

Эксперимент с помощью NanoTest 600 проводился по следующей методике. Образец закреплялся на подложке при помощи клея, затем образец подводился к индентору. После установки образца в держатель экспериментального комплекса производят обработку поверхности пьезопрофилометром. Это необходимо для определения геометрии поверхности, на которой осуществляется вдавливание индентора результаты представлены на рисунке 2.2, однако поверхность исследования расположена под углом к держателю. На ход эксперимента это не повлияло, так как размеры индентора во много раз меньше наклонной площадки. Можно считать, что контакт происходит в точке.

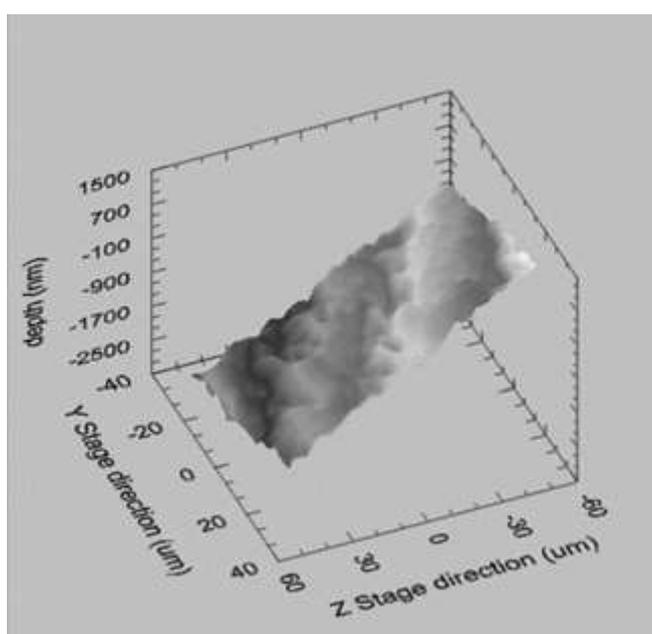
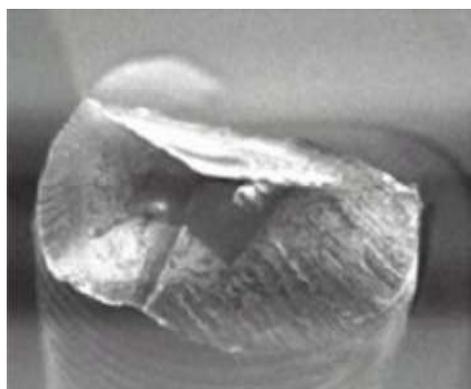
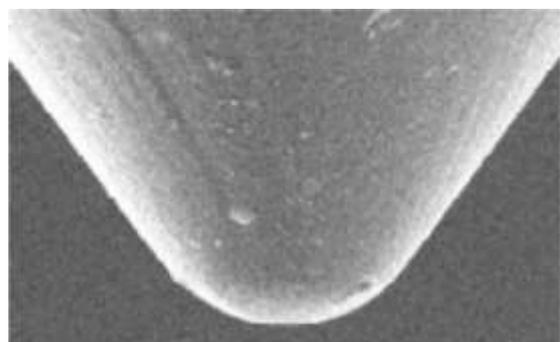


рисунок 2.2 – Топография поверхности полимерного покрытия образца

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 (рисунок 2.3). Радиус сферического индентора составлял 10 мкм. Скорость индентирования была задана из расчёта, что цикл нагрузки должен занимать 20 с.



(а)



(б)

рисунок 2.3 – Инденторы Берковича (а) и сфероконический(б)

По полученным экспериментальным данным компьютерная система комплекса NanoTest 600 автоматически вычисляла ряд параметров: максимальную глубину проникновения, пластическую деформацию, твердость, приведенный модуль, упругое восстановление, податливость контакта, пластическую работу, эластическую работу и другие. При расчёте приведённого модуля (модуль упругости системы образец и индентор) используется модель Оливера – Фарра [69], в соответствии с которой описывается часть зависимости нагрузка-глубина проникновения при разгрузке. Прилагаемое программное обеспечение на основе модели Оливера – Фарра производит расчёт остаточной пластической деформации h_c , твёрдости H и приведённого модуля E_r .

Пластическая деформация h_c определяется из уравнения:

$$h_c = h_{\max} - \varepsilon(CP_{\max}), \quad (2.3)$$

где C – податливость контакта (эквивалентна тангенсу угла наклона кривой разгрузки при максимальном нагружении).

Значение ε зависит от геометрии индентора, для индентора Берковича $\varepsilon = 0,75P_{\max}$ – максимальная нагрузка, h_{\max} – максимальная глубина проникновения индентора.

Функция зависимости площади контакта от глубины погружения $A(h_c)$ определяется при калибровке прибора на специальном калибровочном образце – кварце.

Твёрдость H определяется исходя из максимальной нагрузки P_{\max} и площади контакта индентора с образцом A :

$$H = \frac{P_{\max}}{A}. \quad (2.4)$$

Для вычисления приведенного модуля упругости образца, обрабатывается часть кривой при разгрузке в соответствии с соотношением:

$$C = \frac{dh}{dP} = \frac{\sqrt{\pi}}{2E_r\sqrt{A}}. \quad (2.5)$$

Таким образом, зная значение E_r – приведённого модуля, которое прибор определяет из соотношения (2.5) при обработке экспериментальных данных, по уравнению (2.1) можно рассчитать модуль упругости образца или плёнки на поверхности образца [68]. Для расчетов нам необходимо знать коэффициент Пуассона покрытия, который мы принимаем равным 0,33. Изменение этой величины в пределах 0,2 – 0,4 незначительно влияет на результаты измерений.

2.2 Результаты измерений

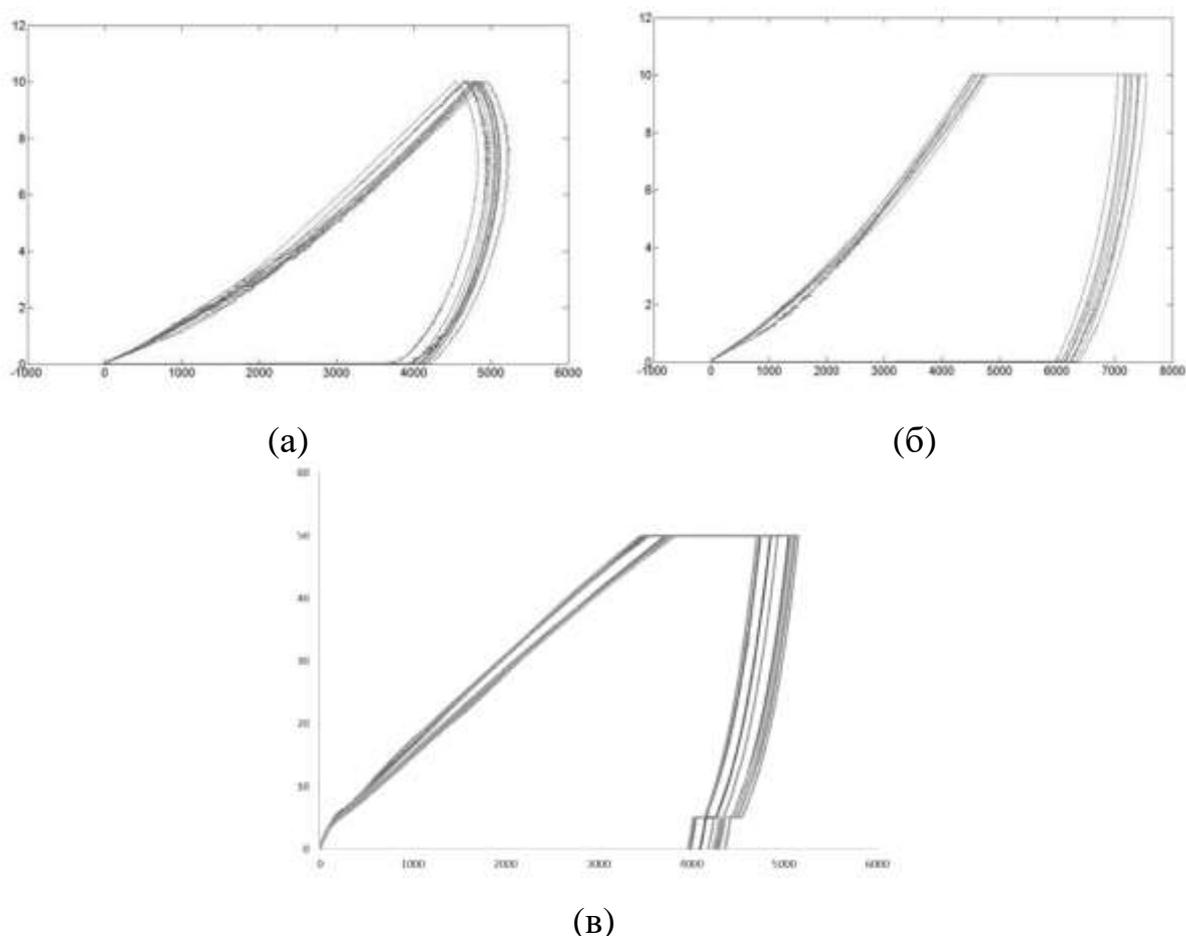
При наноиндентировании лакокрасочных покрытий с использованием индентора Берковича с нагрузкой 10 мН, максимальная глубина проникновения индентора в покрытие составляет 6 мкм. При использовании сферического

индентора с нагрузкой 50 мН, максимальное проникновение составило 5 мкм. Полученная глубина индентирования позволяет свести к минимуму влияние как шероховатости поверхности образца (до 1 мкм), так и более упругой подложки (толщина покрытия 100 мкм) на полученные зависимости нагрузка-деформация. Таким образом, результаты эксперимента характеризуют исключительно механические свойства материала покрытия, о чём также свидетельствует небольшой разброс полученных экспериментальных данных (таблица 2.2, рисунок 2.4).

Таблица 2.2 – Результаты испытаний образцов с порошковым покрытием (в скобках приведено среднеквадратичное отклонение)

Индентор	h_{max} , нм	h_c , нм	P_{max} , мН	H , МПа	E_r , ГПа	E_s , ГПа	C , нм/мН
Берковича	6121 (129)	5802 (124)	10 (0,0)	12,5 (0,5)	0,715 (0,028)	0,64	42,5 (1)
Сферический	4839 (90)	4509 (79)	50 (0,0)	227 (2,8)	6,8 (0,27)	6,1	8,8 (0,3)

В ходе эксперимента по наноиндентированию для зависимости нагрузка – деформация обнаружилось, что деформация продолжает расти при уменьшении нагрузки. При этом на кривой нагрузка – деформация при разгрузке наблюдаем характерный для полимерных материалов выгиб (рисунок 2.4,а), так называемый *nose* [70], что характеризует вязкоупругие свойства полимеров. Чтобы избежать влияния данного эффекта на результат определения механических характеристик покрытия необходимо при максимальной нагрузке выдержать образец довольно длительное время (рисунок 2.4, б и в). За это время при постоянной нагрузке деформация достигнет своего максимального значения, реализуются релаксационные процессы в полимере. После этого кривая разгрузки примет пологую форму, приемлемую для определения упругих свойств по методике Оливера-Фарра.



рисунки 2.4 – Диаграмма нагружения (по горизонтальной оси – перемещение индентора, нм, по вертикальной – нагрузка, Н),

где (а) – без выдержки максимальной нагрузки, индентор Берковича;

(б) – с выдержкой максимальной нагрузки 100 с, индентор Берковича;

(в) – с выдержкой максимальной нагрузки (100 с), сферический индентор

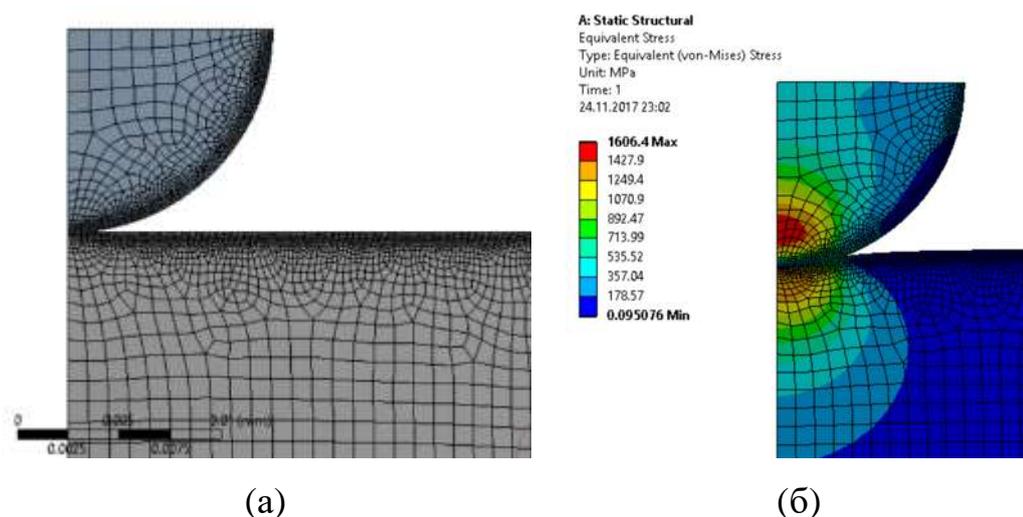
В результате эксперимента было установлено, что при применении индентора Берковича, найденные свойства покрытия оказываются чрезвычайно низкими, по сравнению с известными макроскопическими характеристиками. Так значение рассчитанного модуля Юнга покрытия оказывается равным 0,64 ГПа, что в пять раз ниже известных данных из макроэксперимента (~3 ГПа). В случае применения сферического индентора результат в отношении модуля Юнга покрытия оказывается завышен и составляет 6,1 ГПа, что можно объяснить тем, что для выбранного режима испытаний уже не достаточно хорошо работает

модель Оливера – Фарра, и, вероятно, необходимо использовать иные подходы для идентификации модуля Юнга покрытия.

2.3 Конечно-элементное моделирование процесса наноиндентирования

Для обработки результатов наноиндентирования также привлекалось конечно-элементное моделирование. Рассматривалась задача о внедрении сферического индентора с радиусом закругления 10 мкм (рисунок 2.5, а и б). Задача решалась в осесимметричной постановке с учетом конечных деформаций и с учетом трения между индентором и поверхностью. Коэффициент трения принимался равным 0,2 (изменение этого коэффициента в пределах 0,15 – 0,3 незначительно влияет на результаты). Материал индентора приближенно считался изотропным с упругими характеристиками, соответствующими алмазу. Для покрытия коэффициент Пуассона задавался равным 0,35. Модуль Юнга подбирался таким образом, чтобы диаграмма нагрузка-перемещения, получаемая в результате численного расчета, оказывалась максимально близкой к экспериментальным результатам, полученным методом наноиндентирования на этапе разгрузки (на этапе, когда все вязкоупругие максимально нивелированы).

Сопоставление результатов расчетов и эксперимента показано на рисунке 2.6. Здесь показаны расчетные диаграммы для модуля Юнга покрытия 6 ГПа, 9 ГПа и 11 ГПа. Видно, что вариант $E = 9$ ГПа позволяет наилучшим образом описать экспериментальные данные на участке малых перемещений, для которых и следует определять упругие свойства материала. Разрыв экспериментальной диаграммы вблизи нуля следует рассматривать как погрешность экспериментальных данных и может быть связан отрывом индентора от поверхности покрытия в условиях действия адгезионных сил. Таким образом, численные расчеты показывают еще большее значение модуля Юнга покрытия, по сравнению с аналитическим расчетом по методике Оливера – Фарра.



рисунк 2.5 – Конечно-элементное моделирование процесса наноиндентирования, где (а) – модель, (б) – характерные результаты расчета – внедрение индентора под действием силы 50 мН и соответствующее распределение интенсивности напряжений.

2.4 Выводы

Полученные данные позволяют говорить, во-первых, о существенном влиянии формы индентора на результаты измерений. Применение индентора в форме Берковича, по всей видимости, является неоправданным, так как заостренная вершина пирамиды повреждает или разрезает поверхность покрытия, что и приводит к заниженным идентифицированным упругим свойствам. Применение сферического индентора – более оправдано, так как в этом случае не возникает повреждения поверхности материала. Однако, найденные значения упругих свойств оказываются завышенными в 2-3 раза, если сравнивать их с известными данными из макроэкспериментов и с типичными значениями для исследуемого класса полимеров. Установленный эффект может являться закономерным для рассматриваемого класса покрытий, для которых известно, что уменьшение их толщины приводит к увеличению их модуля упругости [71]. В указанной работе была установлена зависимость модуля Юнга эпоксидных покрытий, определяемая на основе макроиспытаний (рисунк 2.7). Таким

образом, полученные данные для эпоксидно-полиэфирных покрытий толщиной $100 (\pm 30)$ мкм соответствуют данным работы [71].

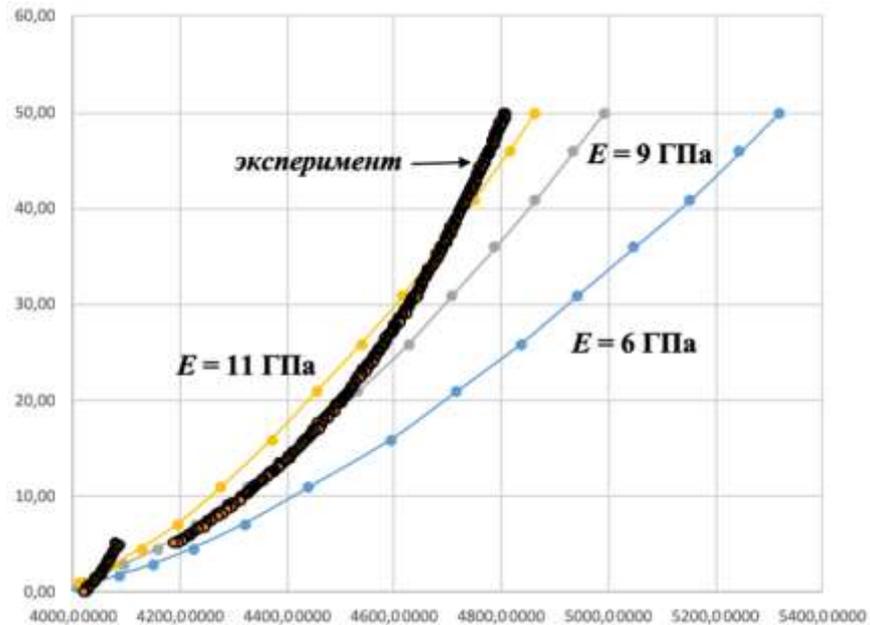


рисунок 2.6 – Сопоставление экспериментальной диаграммы, возникающей при снятии нагрузки с индентора, и результатов расчетов с различным модулем Юнга покрытия

Значительный прогиб экспериментальной диаграммы связан с вязкоупругими эффектами, которые проявляются и в процессе разгрузки.

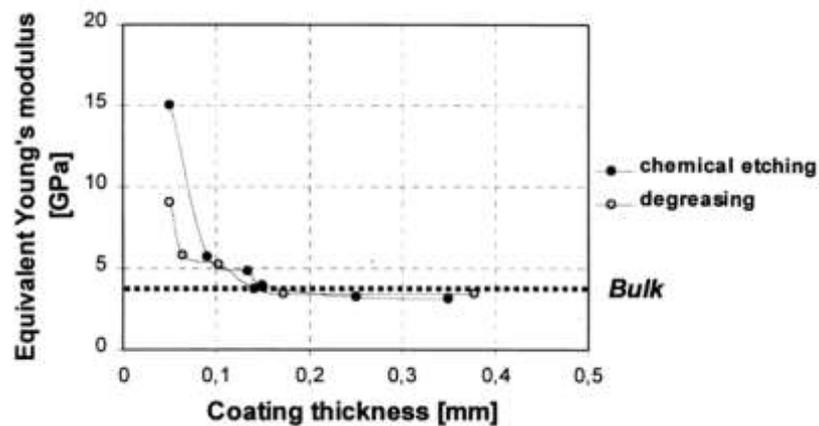


рисунок 2.7 – Зависимость модуля упругости эпоксидного покрытия от его толщины [71]

3 ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ С ПОКРЫТИЯМИ НА ИЗГИБ

Механические испытания проводились на установке Instron 5969 (Великобритания) с программным обеспечением Bluehill 3. В испытаниях на трехточечный изгиб расстояние между опорами составляло 100 мм. Скорость испытания составляла 1 мм/мин. Для точного измерения перемещений пластины при изгибе использовался контактный экстензометр с базой 50 мм, который закреплялся на дефлектометре, установленном по центру под изгибаемым образцом. Испытания на изгиб проводились до максимальных деформаций на растянутых волокнах 0,1%. В результате испытаний на изгиб определялся модуль упругости. Программа автоматически выбирала наиболее характерный интервал на диаграмме напряжения-деформации для определения модуля упругости образцов.

3.1 Результаты испытаний

Сопоставление характерных диаграмм нагрузка-перемещение, полученных для образцов различной толщины с покрытиями и без покрытий в испытаниях на изгиб, продемонстрированы на рисунке 3.1. Каждая диаграмма, представленная на этом рисунке, получена в результате осреднения экспериментальных данных для пяти однотипных образцов. Видно, что жесткость пластин (наклон диаграмм) незначительно изменяется – увеличивается – при наличии на них покрытий. Однако, если пересчитывать модуль упругости пластин по результатам этих испытаний, то для образцов с покрытиями он всегда будет оказываться ниже, по сравнению с образцами без покрытий, вследствие их увеличенной толщины, определяемой с учетом наличия покрытий (см. рисунок 3.2 и таблица 3.1). При условии высокоточного измерения прогибов пластин и нагрузки данный тип испытаний может быть использован для идентификации модуля упругости покрытий [72-74]. В частности, в работе [74] для исследуемых покрытий было найдено значение модуля Юнга, которое составило, порядка 3 ГПа. С точки зрения расчета напряженно-деформированного состояния конструкций,

установленным несущественным влиянием покрытий, в большинстве случаев можно пренебрегать, а использовать полученные результаты только для идентификации собственных свойств покрытий.

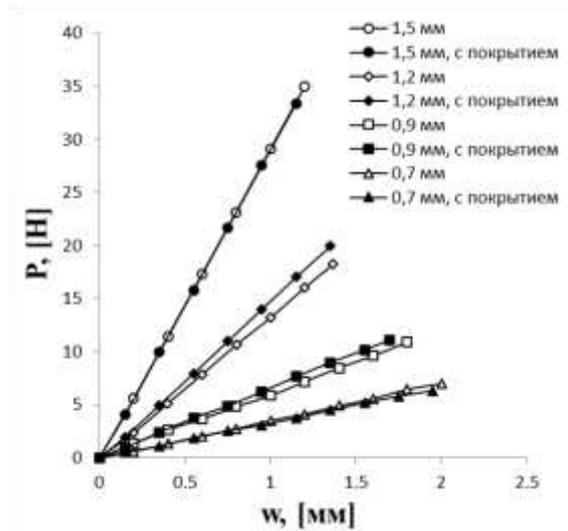


рисунок 3.1 – Диаграммы зависимости прогибов от приложенной нагрузки, полученные при испытании на трехточечный изгиб пластин с различной толщиной стальной подложки с покрытиями и без покрытий

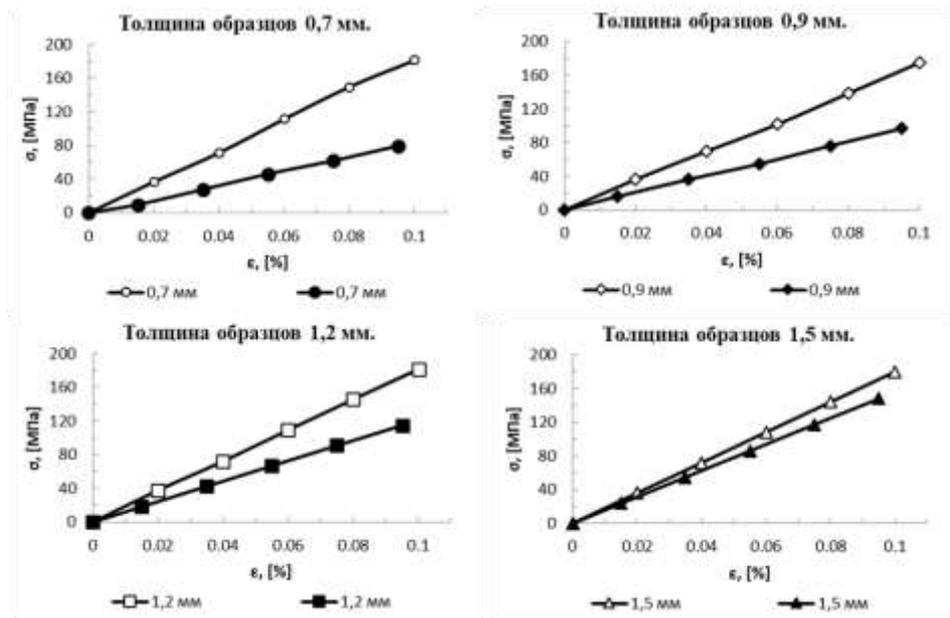


рисунок 3.2 – Диаграммы напряжения-деформации, полученные при испытании на трехточечный изгиб пластин с различной толщиной стальной подложки с покрытиями (черные точки) и без покрытий (белые точки)

Таблица 3.1 – Значения модуля Юнга образцов без покрытия и кажущегося модуля упругости образцов с покрытиями, найденные в результате испытаний на трехточечный изгиб.

Образцы		$E_{изг}$, ГПа
0,7 мм	с покрытием	91
	без покрытия	190
0,9 мм	с покрытием	105
	без покрытия	180
1,2 мм	с покрытием	134
	без покрытия	185
1,5 мм	с покрытием	143
	без покрытия	184

3.2 Оценка модуля упругости покрытия на основе результатов испытаний на изгиб образцов с двусторонним покрытием

Сопоставление характерных диаграмм нагрузка-перемещение, полученных для образцов различной толщины с покрытиями.

Для моделирования деформированного состояния пластин с покрытиями при испытаниях на трехточечный изгиб будем использовать соотношения теории изгиба неоднородных балок [75-76]. Пластины с покрытием будем рассматривать, как неоднородную по толщине полосу или балку, состоящую из трех слоев – центральный слой из стали и два внешних слоя из эпоксидной смолы (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Модель стальных образцов с полимерным покрытием

Длина рабочей части образцов (или расстояние между опорами при изгибе) $L = 100$ мм. Толщина слоев покрытия $h = 0,1$ мм, толщина стали $H = 0,7-1,5$ мм.

Изгибающий момент M , действующий в центральной части образца, можно представить в виде суммы:

$$M = M_n + M_{cm}, \quad (3.1)$$

где M_n – часть момента, приходящаяся на слои покрытия; M_{cm} – часть момента, соответствующая сопротивлению стальной полосы.

Выражая моменты через модули Юнга и моменты инерции слоев и учитывая наличие двух слоев покрытия, получаем:

$$\frac{E^* J}{R} = 2 \frac{E_n J_n}{R} + \frac{E_{cm} J_{cm}}{R}, \quad (3.2)$$

где E^* – кажущийся модуль упругости, который может быть определен для образца с покрытием в испытаниях на изгиб, J, J_n, J_{cm} – моменты инерции полного поперечного сечения образца, слоя покрытия и стали, соответственно; R – радиус кривизны изогнутого образца.

$$J = \frac{b(H + 2h)^3}{12},$$

$$J_{cm} = \frac{bH^3}{12}, \quad (3.3)$$

$$J_n = \frac{bh^3}{12} + \left(\frac{h + H}{2} \right)^2 \cdot hb.$$

Здесь учтено, что слои покрытия смещены относительно нейтральной линии образца на величину $\frac{H + h}{2}$. Подставляя (3.3) в (3.2), получаем следующую нелинейную зависимость изгибного модуля упругости образца от толщины слоев покрытия и стали:

$$E^* = 2E_n \frac{4h^3 + 6h^2H + 3hH^2}{(H + 2h)^3} + E_{cm} \frac{H^3}{(H + 2h)^3}. \quad (3.4)$$

На рисунке 3.4 представлена зависимость значений кажущегося модуля упругости при изгибе образцов с покрытиями, рассчитанная по формуле (3.4). В

качестве исходных данных использованы следующие значения модулей Юнга используемых материалов: для стали 08ПС составляет $E_{cm}=190$ ГПа, для полимерного покрытия – $E_n = 3, 6, 9, 12$ ГПа. Зависимость построена от относительной толщины слоя стали в образце $\frac{H}{(H+2h)}$ Изгибный кажущийся модуль нелинейно зависит от этого параметра, и величина модуля упругости покрытия незначительно влияет на его значения, особенно, при больших относительных толщинах подложки. Поэтому подобные эксперименты затруднительно использовать для идентификации свойств податливых покрытий – необходимо применять более податливые и тонкие материалы подложек. На рисунке 3.5 показано, что экспериментальный разброс данных, полученный при испытании стальных пластин толщиной 0,7 – 1,5 мм с покрытиями не позволяет определить достоверно характеристику покрытия. Однако, если использовать средние значения кажущегося модуля, то наилучшее приближение к эксперименту дает расчет с использованием модуля покрытия $E = 3$ ГПа, что соответствует типичным характеристиками эпоксидно-полиэфирных смол.

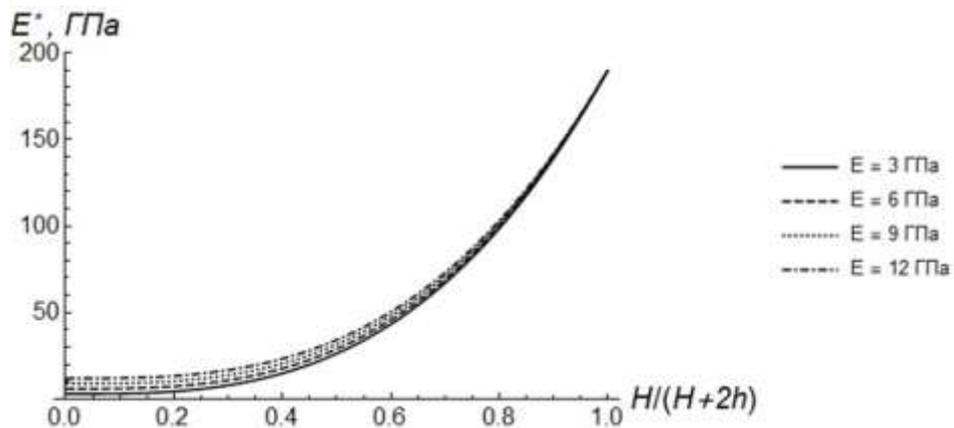
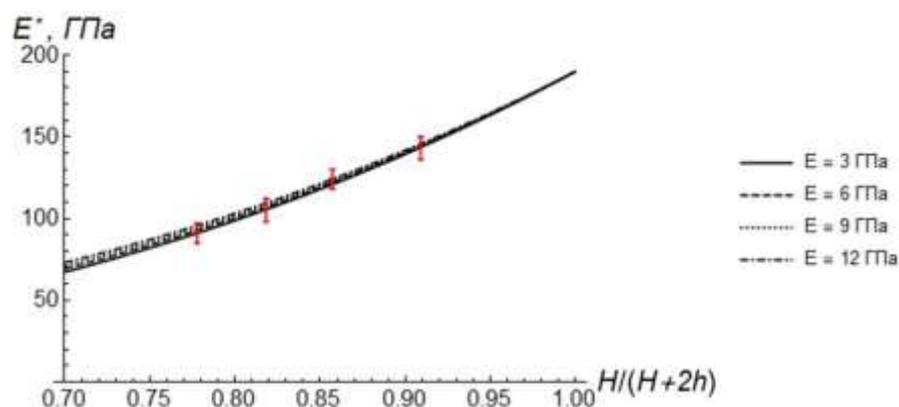


рисунок 3.4 – Зависимость кажущегося модуля упругости образцов с покрытиями E^* при изгибе от относительной толщины подложки при различных значениях модуля Юнга покрытий



рисунки 3.5 – Сопоставление расчетных и экспериментальных значений кажущегося модуля упругости пластин с покрытиями. Показан разброс экспериментальных данных

3.3 Определение модуля Юнга покрытий из испытания образцов с односторонним покрытием и с учетом остаточных температурных напряжений

Для получения уточненных оценок механических свойств покрытий и, в частности, модуля Юнга, представляется целесообразным проводить исследования на образцах с односторонним нанесением покрытий. В таких образцах вследствие остаточных температурных напряжений при достаточно малой толщине подложки возникают деформации изгиба, связанные с не симметрией структуры и различием коэффициентов температурного расширения (КТР) покрытия и подложки. Измерение этих, достаточно больших, изгибных деформаций может быть реализовано на стандартном оборудовании для механических испытаний, а процедура идентификации свойств покрытия не требует знания КТР применяемых материалов. Формулировка и реализация такой методики измерений представлена в данном разделе диссертации.

Эквивалентная (кажущаяся, определяемая в эксперименте) изгибная жесткость двухслойной структуры на изгиб без учета остаточных деформаций определяется на основании следующего стандартного соотношения из теории сопротивления материалов:

$$(EI)_{eq} = E_c I_c + E_s I_s + \frac{E_c I_c E_s I_s \left(\frac{h_c}{2} + \frac{h_s}{2} \right)^2}{E_c S_c + E_s S_s}, \quad (3.5)$$

где $(EI)_{eq}$ - эквивалентная изгибная жесткость, E – модули Юнга, I – моменты инерции, h – толщины, S – площади поперечных сечений покрытий, индексы c относятся к слою покрытия, а индексы s – к подложке.

Очевидно, что из (3.5) следует следующее выражение для определения модуля Юнга покрытия, которое представляет собой квадратное уравнение:

$$E_c^2 (I_c S_c) + E_c (I_c E_s S_s + S_c E_s S_s H - X S_c) - X E_s S_s = 0, \quad (3.6)$$

где $X = (EI)_{eq} - E_s I_s$ и $H = \left(\frac{h_c}{2} + \frac{h_s}{2} \right)^2$.

Проведение испытаний с симметричными структурами, как это было показано в предыдущем разделе, позволяет оценить свойства покрытий, однако требует высокого разрешения испытательного оборудования с точки зрения оценки перемещений образца и прикладываемых усилий. В двухслойной структуре метод расчета оказывается более сложным, чем простое применение формулы (3.6), так как требует учета остаточных деформаций изгиба образца, однако при этом удастся использовать стандартное оборудование. Получению оценок для остаточных напряжений, действующих в покрытиях, посвящена глава 6.

В данном разделе лишь запишем, что уровень напряжений, действующих в слое покрытия и в подложке в образце после его изготовления может быть найден из следующего соотношения, следующего из классической теории слоистых балок типа Бернулли-Эйлера:

$$\left({}^R \sigma_X \right)_{c,s} = \left(\sigma_X^0 \right)_c + E_{c,s} \frac{Z_0 - Z}{R_1}, \quad (3.7)$$

где $\left({}^R \sigma_X \right)_{c,s}$ $\left(\sigma_X^0 \right)_c$ – остаточные напряжения, действующие в покрытии без учета изгиба; $E_{c,s} Z$ – 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.

Выражение (3.7) является удобной аналитической оценкой, позволяющей определить уровень остаточных напряжений, действующих в покрытии и в подложке без знания их КТР и «истории» нагрева/охлаждения образца (без знания температуры, обеспечивающей нейтральное состояние образца без остаточных напряжений). Необходимо только знать модули Юнга слоев и измерить радиус кривизны образца. На основе этого выражения (3.7) в главе 6 получены оценки остаточных температурных напряжений, действующих в покрытии с использованием различных значений модуля Юнга, найденных различными методами. Там же представлен вывод этого выражения. В данном разделе, проводится идентификация модуля Юнга покрытия, которая предполагает, что заранее неизвестны свойства слоев, но известна лишь кривизна образца после изготовления.

Таким образом, мы имеем две неизвестные характеристики: модуль Юнга покрытия E_c и величину остаточных напряжений, действующих в покрытии, $(\sigma_x^0)_c$. Для определения этих величин предлагается проведение испытаний на трехточечный изгиб образцов с односторонним покрытием. По результатам ряда таких испытаний возможно определить все неизвестные параметры задачи. Для обработки результатов испытаний необходимо решить задачу об изгибе двухслойной балки под действием сосредоточенной силы. В частности, деформации в слоях образца $({}^M \varepsilon_x)_{c,s}$ в процессе испытаний определяются соотношением [71]:

$$({}^M \varepsilon_x)_{c,s} = \frac{[R_2 + (Z_0 - Z)]d\phi - [R_1 + (Z_0 - Z)]d\theta}{[R_1 + (Z_0 - Z)]d\theta}, \quad (3.8)$$

где R_2 – радиус кривизны образца, реализующийся в процессе испытаний (зависит от действующей внешней нагрузки), $d\theta$ – бесконечно малый угол, определяющий длину участка образца до испытаний (этот угол соответствует начальному

деформированному состоянию образца до испытаний), $d\phi$ – бесконечно малый угол, определяющий длину того же самого участка образца после приложения нагрузки, причем указанные малые углы удовлетворяют соотношению:

$$R_1 d\theta = R_2 d\phi \Rightarrow d\phi = \frac{R_1}{R_2} d\theta. \quad (3.9)$$

Таким образом получаем выражение для деформаций:

$$\left({}^M \varepsilon_X\right)_{c,s} = \frac{(Z_0 - Z)(R_1 - R_2)}{[R_1 + (Z_0 - Z)]R_2}. \quad (3.10)$$

Учитывая, что толщина образца мала по сравнению с радиусом кривизны образца, а величина $(Z_0 - Z)$ по своему порядку не превосходит толщины образца, то записанное выражение упрощается:

$$\left({}^M \varepsilon_X\right)_{c,s} = (Z_0 - Z) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right). \quad (3.11)$$

Заметим, что из полученного выражения, очевидным образом следует классическое линейное соотношение, связывающее деформацию и радиус кривизны образца в отсутствие остаточных напряжений:

$$\left({}^M \varepsilon_X\right)_{c,s} = \frac{Z_0 - Z}{R_2}. \quad (3.12)$$

Далее определим напряжения, действующие в слоях образца при изгибе, используя закон Гука и соотношение (3.10):

$$\left({}^M \sigma_X\right)_{c,s} = E_{c,s} \times \left({}^M \varepsilon_X\right)_{c,s} = E_{c,s} \times (Z_0 - Z) \times \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right). \quad (3.13)$$

Предполагая выполнение принципа суперпозиции, полные напряжения, действующие в покрытии и в подложке, определяются суммой остаточных напряжений (3.7) и напряжений вызванных внешней нагрузкой (3.13). После преобразований получим:

$$\left(\sigma_X\right)_{c,s} = \left({}^R \sigma_X\right)_{c,s} + \left({}^M \sigma_X\right)_{c,s} = \left(\sigma_X^0\right)_c + E_{c,s} \frac{Z_0 - Z}{R_2}. \quad (3.14)$$

Напряжения (3.14) должны удовлетворять уравнения равновесия в любом сечении балки. Далее для определения координаты нейтральной оси образца необходимо рассмотреть уравнение равновесия по усилиям в направлении оси образца:

$$\sum_n F_n = 0 \Rightarrow \int_S (\sigma_x)_{c,s} dS_{c,s} = 0. \quad (3.15)$$

Подставляя в это выражения выражение для напряжений (3.14), находим:

$$b_c \int_{-h_c}^0 (\sigma_x^0) dZ + \frac{E_c^* b_c}{R_2} \int_{-h_c}^0 (Z_0 - Z) dZ + \frac{E_s b_s}{R_2} \int_0^{h_s} (Z_0 - Z) dZ = 0,$$

$$Z_0 = -\frac{(\sigma_x^0)_c S_c R_2}{E_c^* S_c + E_s S_s} + \frac{1}{2} \times \frac{E_s S_s h_s - E_c^* S_c h_c}{E_c^* S_c + E_s S_s}. \quad (3.16)$$

Причем, в отсутствие остаточных напряжений координата нейтральной оси определяется обычным соотношением:

$$Z_0' = \frac{\frac{h_c}{2} (E_c^* S_c + E_s S_s) + \left(\frac{h_c}{2} + \frac{h_s}{2} \right) E_s S_s}{E_c^* S_c + E_s S_s}. \quad (3.17)$$

Далее для получения выражения, обобщающего соотношение (3.5) на случай действия остаточных напряжений и включающее его, в качестве частного случая, когда остаточные напряжения отсутствуют, рассматриваем уравнение равновесия по моментам. Получим выражение, в которой в правой части стоит ненулевой момент, возникающий от действия внешней нагрузки и вычисляющихся через эквивалентную изгибную жесткость образца и изменение радиуса его кривизны:

$$\sum_n M_n = -(EI)_{eq}^* \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \Rightarrow \int_S (\sigma_x)_{c,s} Z dS_{e,s} = -(EI)_{eq}^* \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right). \quad (3.18)$$

Используя выражение для напряжений (3.14), находим:

$$b_c \int_{-h_c}^0 (\sigma_x^0) Z dZ + \frac{E_c^* b_c}{R_2} \int_{-h_c}^0 (Z_0 - Z) Z dZ + \frac{E_s b_s}{R_2} \int_0^{h_s} (Z_0 - Z) Z dZ = -(EI)_{eq}^* \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right). \quad (3.19)$$

Далее, подставляя найденное значение координаты нейтральной оси балки (3.15), получаем:

$$(EI)_{eq}^* \left(1 - \frac{R_2}{R_1}\right) = (\sigma_X^0)_c \frac{S_c E_s S_s (h_c + h_s) R_2}{2 E_c^* S_s + E_s S_s} + E_c^* I_c + E_s I_s + \frac{E_c^* S_c E_s S_s}{E_c^* S_c + E_s S_s} \left(\frac{h_c}{2} + \frac{h_s}{2}\right)^2. \quad (3.20)$$

В случае, если ширина подложки и покрытия совпадают ($b_c = b_s = b$), имеем:

$$(EI)_{eq}^* \left(1 - \frac{R_2}{R_1}\right) = (\sigma_X^0)_c \frac{b h_c E_s h_s (h_c + h_s) R_2}{2 E_c^* h_c + E_s h_s} + E_c^* I_c + E_s I_s + \frac{E_c^* h_c E_s h_s b}{E_c^* h_c + E_s h_s} \left(\frac{h_c}{2} + \frac{h_s}{2}\right)^2. \quad (3.21)$$

Записанное выражение (3.20) обобщает (3.5) на случай ненулевых остаточных напряжений в двухслойном образце (в случае $(\sigma_X^0)_c = 0$ и $R_1 \rightarrow \infty$).

Последней задачей, которую необходимо решить, является получение оценок для остаточных напряжений $(\sigma_X^0)_c$, действующих в покрытии. После этого выражение (3.21) может быть использовано для обработки экспериментальных данных по трехточечному изгибу образцов для идентификации модуля Юнга покрытия. В частности, будем использовать несколько аналитических решений для прогноза остаточных напряжений в покрытии, которые подробно обсуждаются в главе 6. Во-первых рассмотрим классическое решение Стоуни (Stoney) [72] для остаточных напряжений в покрытии, толщина которого пренебрежимо мала, по сравнению с толщиной подложки:

$$\sigma^{Stoney} = -\frac{E_s h_s^2}{6 h_c R_1}. \quad (3.22)$$

Используя это выражение в качестве $(\sigma_X^0)_c$ в выражении (3.21), получим:

$$E_c^{*2} (I_c h_c) + E_c^* (I_c E_s h_s + E_s b h_c h_s H - X^* h_c) - E_s h_s \left[X^* + E_s I_s \left(1 + \frac{h_c}{h_s}\right) \frac{R_2}{R_1} \right] = 0, \quad (3.23)$$

где $X^* = (EI)_{eq}^* \left(1 - \frac{R_2}{R_1}\right) - E_s I_s$.

Выражение, обобщающие формулу Стоуни на случай сопоставимых толщин покрытия и подложки, но с учетом $\left(\frac{h_c}{h_s}\right)^2 \ll \frac{h_c}{h_s}$, было получено Роллем[71]:

$$\sigma^{Roll} = -\frac{E_s h_s^2}{6h_c R} \times \left[1 + (4\alpha^* - 1)\beta\right], \quad (3.23)$$

где $\alpha = \frac{E_c}{E_s}$, $\beta = \frac{h_c}{h_s}$.

Подставляя эту оценку для $(\sigma_x^0)_c$ выражение (3.21), получим:

$$E_c^{*2} (I_c h_c) + E_c^* \left[I_c E_s h_s + b h_c E_s h_s H - X^* h_c - 4 E_s I_s (h_c + h_s) \frac{h_c}{h_s} \frac{R_2}{R_1} \right] - \\ - X^* E_s h_s - E_s^2 I_s \left(h_s - \frac{h_c^2}{h_s} \right) \frac{R_2}{R_1} = 0. \quad (3.24)$$

Учет более высоких степеней относительной толщины покрытия дает следующее выражение для остаточных напряжений в покрытии, в пренебрежении продольными деформациями образца (см. главу 6):

$$(\sigma^0)_c^* = -\frac{E_c^{*2} h_c^4 - 2 E_c^* h_c E_s h_s (2 h_c^2 + 3 h_c h_s + 2 h_s^2) + E_s^2 h_s^4}{6 h_c E_s h_s (h_c + h_s) R_1}, \quad (3.25)$$

и с учетом продольных деформаций образца:

$$(\sigma^0)_c^{**} = -\frac{E_c^{*2} h_c^4 - 2 E_c^* h_c E_s h_s (2 h_c^2 + 3 h_c h_s + 2 h_s^2) + E_s^2 h_s^4}{6 h_c (h_c + h_s) (E_c^* h_c + E_s h_s) R_1}. \quad (3.26)$$

Подставляя эти выражения в (3.21), имеем, соответственно:

$$E_c^{*2} \left[I_c h_c \left(1 - \frac{R_2}{R_1} \right) \right] + \\ + E_c^* \left[I_c E_s h_s + b h_c E_s h_s H - X^* h_c - \frac{b h_c E_s h_s}{6} \times \frac{R_2}{R_1} \left(2 (h_c + h_s)^2 - h_c h_s \right) \right] - \\ - E_s h_s \left(X^* + E_s I_s \frac{R_2}{R_1} \right) = 0 \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned}
& E_c^{*3} (I_c h_c^2) + E_c^{*2} \left[I_c h_s h_s E_s \left(2 - \frac{R_2}{R_1} \right) + h_c^2 (E_s h_s H - X^*) \right] + \\
& + E_c^* \left[-X^* E_s h_s (h_c + h_s) - S_c E_s^2 h_s^2 (2h_c^2 + 3h_c h_s + 2h_s^2) \frac{R_2}{6R_1} + E_s^2 h_s^2 (I_c + S_c H) \right], \quad (3.28) \\
& - E_s^2 h_s^2 \left(E_s I_s \frac{R_2}{R_1} + X^* \right) = 0
\end{aligned}$$

Таким образом, имеем четыре выражения для определения модуля Юнга покрытий (3.23)-(3.28). Эти решения будут применяться для обработки экспериментальных данных.

Для определения радиуса кривизны образцов, который вообще говоря оказывается очень мал до испытаний (в результате остаточных деформаций) и в процессе испытаний, будем использовать следующие соотношения. Во-первых, необходимо учитывать, что прогиб в центральной точке образца складывается из постоянного прогиба, вызванного остаточной деформацией δ_j и прогиба d_j , возникающим при действии внешней нагрузки:

$$\delta_j' = d_j + \delta_j. \quad (3.29)$$

Начальный радиус кривизны образца может быть с достаточной степени точности выражен через его длину L и начальный прогиб через соотношение:

$$R_1 = \frac{L^2}{8\delta_j}. \quad (3.30)$$

Текущий радиус кривизны образца, реализующихся при приложении нагрузки к образцу, лежащему на опорах, расстояние между которыми составляет L_j (индекс j определяет задаваемый вариант испытаний с различными расстояниями между опорами), определяется аналогичным соотношением:

$$R_2 = \frac{L_j^2}{8\delta_j'} + \frac{\delta_j'}{2} \cong \frac{L_j^2}{8\delta_j'}. \quad (3.31)$$

Для оценки текущего прогиба будем использовать не упрощенное выражение (3.30), которое использует предположение о малости начального прогиба по отношению к радиусу кривизны и длине образца, а общее

соотношение, связывающее величину прогиба участка образца длиной L_j и радиусом R_1 :

$$\delta_j^2 - 2R_1\delta_j + \left(\frac{L_j}{2}\right)^2 = 0. \quad (3.32)$$

Откуда, соответственно получаем:

$$\delta_j = R_1 - \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{L_j}{2}\right)^2}. \quad (3.33)$$

Подставляя это выражение в (3.30) получаем связь прогиба изначально искривленного образца с радиусом его текущей кривизны, которое будем использовать для обработки результатов испытаний образцов на трехточечный изгиб:

$$R_2 = \frac{L_j^2}{8 \left(d_j + R_1 - \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{L_j}{2}\right)^2} \right)}. \quad (3.34)$$

Для обработки результатов испытаний используем классическое решение для определения кажущегося модуля Юнга образца (без учета его двухслойной структуры) по диаграмме нагрузка-перемещение:

$$\left(E_{app}\right)_j = \frac{L_j^3}{4bh^3} \left(\frac{P}{\delta}\right). \quad (3.35)$$

Соответственно, эквивалентная изгибная жесткость образца:

$$\left(EI\right)_{eq}^* = \left(E_{app}\right)_j I^*, \quad (3.36)$$

где $I^* = bh^3/12 \left(1 + 3/5(h/2R_1)^2\right)$ и $h = h_c + h_s$.

В испытаниях были исследованы образцы двух материалов: сталь 0,8ПС ($E=200$ ГПа и $\mu=0,33$) и Д19 ($E=70$ ГПа и $\mu=0,3$). С нанесенным порошковым покрытием на эпоксидно-полиэфирной основе марки EUROPOLVERI ($E=3$ ГПа и $\mu=0,4$). Покрытие наносилось с одной стороны образца и после изготовления в них возникал изгиб. Параметры исследуемых образцов представлены в таблице

3.2. Замер начального прогиба образцов проводился в испытания, представленных на рисунке 3.6: образец клался на ровную поверхность и сверху на него по центру прикладывалась нагрузка на испытательной машине. Датчик нагрузки регистрировал момент касания образца и момент его полного выпрямления, что позволяло с высокой точностью определять начальный прогиб образцов.



рисунк 3.6– Испытания образцов для определения начального прогиба

Отметим, что вследствие эффектов вязкоупругости, в образцах прогиб изменялся со временем. Значения прогиба непосредственно после изготовления представлены в таблице 3.3. Эти значения больше, чем представленные в таблице 3.2. Со временем, напряжения в покрытии релаксировали и прогибы образцов уменьшались. В таблице 3.2 представлены результаты испытаний образцов спустя 20 дней после их изготовления.

Результаты испытаний образцов с односторонним покрытием на трехточечный изгиб при различном расстоянии между опорами представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.2 – Параметры исследуемых образцов

№ образца	Толщина (после покрытия)	Ширина (после покрытия)	Прогиб	
Д19	1-8	0,44	10,33	0,245
	2-9	0,6	11,01	0,49
	2-11	0,77	10,79	0,28
	2-17	0,53	10,43	0,74
	2-28	0,49	11,36	0,34
	2-18	0,51	11,88	0,72
сталь 0,8ПС	0,8п-1	0,93	12,16	0,33
	0,8п-2	0,92	12,06	0,21
	0,8п-3	0,91	12,04	0,29
	0,8п-4	0,93	12,14	0,018
	0,8п-5	0,96	12,15	0,13
	0,8п-6	0,92	12,06	0,001
сталь 0,8ПС	1п-1	1,18	11,97	0,13
	1п-2	1,21	11,92	0,04
	1п-3	1,16	12,01	0,23
	1п-4	1,19	11,95	0,07
	1п-5	1,17	12,03	0,011
	1п-6	1,17	11,90	0,023

Таблица 3.3 – Прогиб, полученный сразу после нанесения покрытия

№ образца	Прогиб образца сразу после нанесения
1п-1	0,37
1п-2	0,30
1п-3	0,29
1п-4	0,41
1п-5	0,31
1п-6	0,26
2п-1	0,58
2п-2	0,63
2п-3	0,67
2п-4	0,72
2п-5	0,49
2п-6	0,54

Таблица 3.4 – Результаты испытаний образцов с односторонним покрытием

Расстояние между опорами, мм	№ образца	Модуль Упругости, ГПа
102	8_102	61,69
102	9_102	54,41
104	11_104	34,45
104	18_104	44,58
106	17_106	74,59
106	28_106	87,87
108	8_108	62,79
108	11_108	37,51
110	9_110	66,64
110	8_110	73,22
102	0.8п-1_102	145,41
102	0.8п-2_102	147,02
104	0.8п-3_104	148,83
104	0.8п-4_104	145,15
106	1п-5_106	128,30
106	1п-6_106	73,48
108	1п-1_108	137,79
108	1п-5_108	136,80
110	1п-6_110	156,39
110	1п-2_110	141,60

Полученные данные были обработаны с целью идентификации модуля Юнга покрытия на основе изложенный в данной главе расчетных моделей. В качестве исходных значений принимались свойства стали 0,8ПС ($E=200$ ГПа и $\mu=0,33$), алюминия Д16Т ($E=70$ ГПа и $\mu=0,33$).

Алгоритм расчета следующий. Используем 4 модели расчета для измерения модуля упругости покрытия с различной точностью. По данным таблиц 3.2 и 3.4

определялись радиусы кривизны образцов до и в процессе испытаний по формулам:

$$R_1 = \frac{L^2}{8\delta_j},$$

$$\delta_j = R_1 - \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{L_j}{2}\right)^2}, \quad (3.36)$$

$$R_2 = \frac{L_j^2}{8 \left(d_j + R_1 - \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{L_j}{2}\right)^2} \right)}.$$

Далее проводился расчет по одной из четырех моделей:

Модель 1:

$$\sigma_{x01c} = \frac{-Es * hs^2}{6 * hc * R1},$$

$$Z01 = \frac{-Ec1hc^2 + Eshs^2 - 2hcR2\sigma_{x01c}}{2(Ec1hc + Eshs)},$$

$$E1eq = \frac{b * (hs + hc)^3}{12 * \left(1 + \frac{3}{5} * \left(\frac{hc + hs}{2 * R1} \right)^2 \right)} * (EsEQ),$$

$$\sigma_{xc1} = \sigma_{x01c} + Ec \frac{1 * Z01 - Z}{R2},$$

$$\sigma_{xs1} = \frac{Es * Z01 - Z}{R2},$$

$$\int_{-hc}^0 Z * (\sigma_{xc1} * b) dZ + \int_0^{hs} Z * (\sigma_{xs1}) * b dZ = -(E1eq) * \left(\frac{1}{R2} - \frac{1}{R1} \right).$$

Модель 2:

$$\sigma_{x02c} = \frac{-Es * hs^2}{6 * hc * R1} * \left(1 + \frac{\left(\frac{4 * Ec2}{Es} - 1 \right) * hc}{hs} \right),$$

$$Z_{02} = \frac{-Ec2hc^2 + Eshs^2 - 2hcR2\sigma x_{02c}}{2(Ec2hc + Eshs)},$$

$$\sigma_{xc2} = \sigma_{x_{02c}} + Ec \frac{2 * Z_{02} - Z}{R2},$$

$$\sigma_{xs2} = \frac{Es * Z_{02} - Z}{R2}.$$

Модель 3:

$$\sigma_{x_{03c}} = \frac{-\left(Ec3^2 * hc^4 + 2 * hc * Ec3 * hs * Es * \left(2 * hc^2 + 3 * hc * hs + 2 * hs^2\right) + Es^2 * hs^4\right)}{\left(6 * hc * Es * hs * (hc + hs) * R1\right)},$$

$$Z_{03} = \frac{-Ec3hc^2 + Eshs^2 - 2hcR2\sigma_{x_{03c}}}{2(Ec3hc + Eshs)},$$

$$\sigma_{xc3} = \sigma_{x_{03c}} + Ec \frac{3 * Z_{03} - Z}{R2},$$

$$\sigma_{xs3} = \frac{Es * Z_{03} - Z}{R2},$$

$$\int_{-hc}^0 Z * (\sigma_{xc3} * b) dZ + \int_0^{hs} Z * (\sigma_{xs3}) * b dZ = -(EIQ) * \left(\frac{1}{R2} - \frac{1}{R1}\right).$$

Модель 4:

$$\sigma_{x_{04c}} = \frac{-\left(E4c^2 * hc^4 + 2 * hc * E4c * hs * Es * \left(2 * hc^2 + 3 * hc * hs + 2 * hs^2\right) + Es^2 * hs^4\right)}{\left(6 * hc * (hc + hs) * (E4c * hc + Es * hs) * R1\right)},$$

$$Z_{04}[i] = \frac{-E4chc^2 + Eshs^2 - 2hcR2\sigma_{x_{04c}}}{2(E4chc + Eshs)},$$

$$\sigma_{xc4} = \sigma_{x_{04c}} + E4 \frac{c * Z_{04} - Z}{R2},$$

$$\sigma_{xs4} = \frac{Es * Z_{04} - Z}{R2},$$

$$\int_{-hc}^0 Z * (\sigma_{xc4} * b) dZ + \int_0^{hs} Z * (\sigma_{xs4}) * b dZ = -(EIQ) * \left(\frac{1}{R2} - \frac{1}{R1}\right).$$

Результаты расчета образцов с алюминиевой подложкой по каждой из модели представлены в таблице 3.5, для стальных – в таблице 3.6. Примеры диаграмм нагрузка-перемещения, полученных для различных образцов, показаны на рисунках 3.7–3.8. В целом, полученные значения коррелируют с данными по наноиндентированию покрытий и по испытанию образцов с двусторонним покрытием. В качестве более предпочтительной модели можно отметить модели 3,4 которые дают более стабильные результаты в отношении независимости идентифицируемых свойств покрытий от расстояния между опорами в испытаниях.

Таблица 3.5 – Значения модуля Юнга покрытий, найденные по результатам испытаний образцов на алюминиевых подложках

Номер образца	Номер модели			
	1	2	3	4
8_102	2,5	6,4	7,8	5,5
9_102	1,5	3,7	5,3	3,6
11_104	2,3	1,2	1,5	1,5
18_104	7,1	7,0	7,6	7,2
17_106	3,9	5,1	9,8	7,0
28_106	6,0	14	17,0	1,5
8_108	8,5	1,1	2,3	5,7
11_108	7,8	6,08	7,0	6,7
9_110	6,8	9,7	6,8	5,1
8_110	6,3	3,7	6,4	7,7

Таблица 3.6 – Значения модуля Юнга покрытий, найденные по результатам испытаний образцов на стальных подложках

Номер образца	Номер модели			
	1	2	3	4
0,8п-1-102	2,90	9,50	10,00	9,80
0,8п-2-102	1,10	1,20	1,60	1,40
0,8п-3-104	2,30	2,20	2,80	2,30
0,8п-4-104	9,43	9,21	9,24	9,20
0,8п-5-106	6,70	4,30	6,00	6,30
0,8п-6-106	3,80	3,80	3,80	3,80
0,8п-1-108	2,50	2,20	2,0	2,30
0,8п-5-108	5,70	5,80	5,50	5,90
0,8п-6-110	5,50	5,50	5,50	5,50
0,8п-2-110	2,30	2,70	2,20	2,80
1п-1-102	3,70	3,10	3,50	3,20
1п-2-102	1,63	1,11	1,20	1,20
1п-3-104	4,30	4,10	4,00	4,20
1п-4-104	3,80	3,50	3,80	3,60
1п-5-106	2,50	2,40	2,40	2,40
1п-1-108	4,90	4,80	4,30	4,90
1п-6-108	4,00	4,00	4,10	4,00
1п-2-110	8,60	8,10	8,30	8,00
1п-3-110	5,60	5,80	5,90	5,90

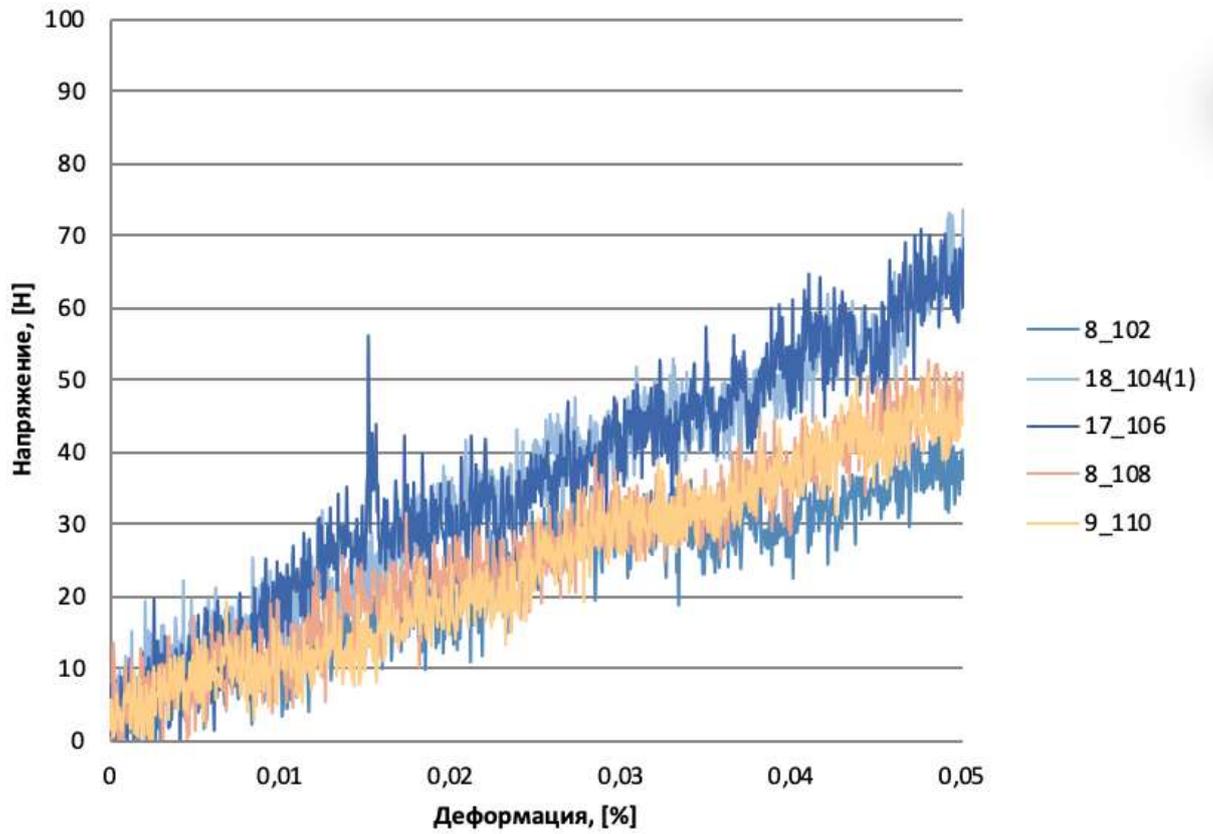
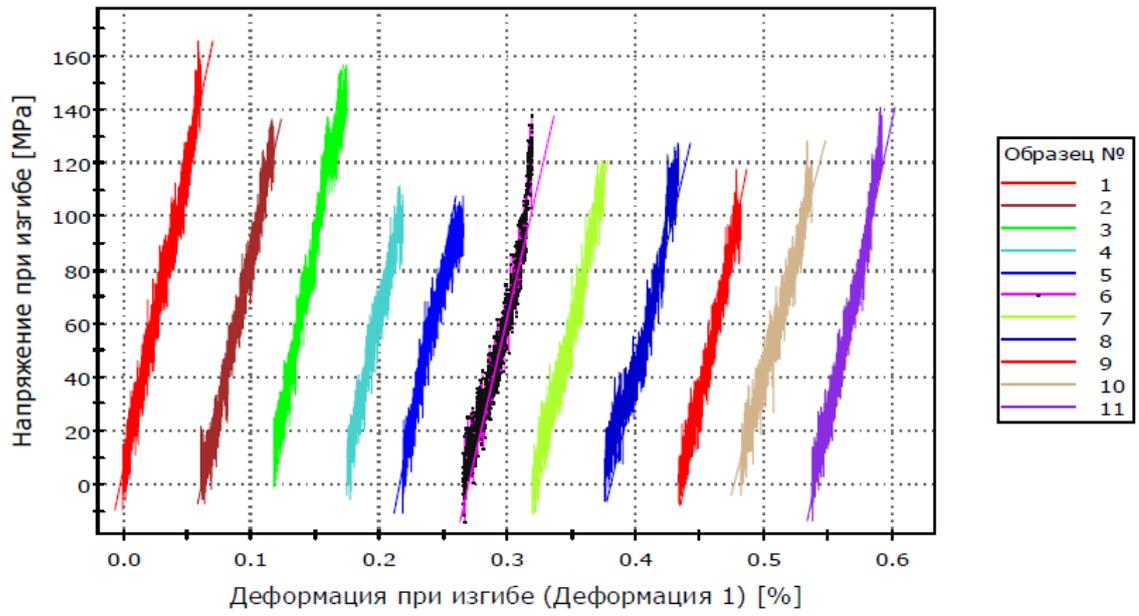


рисунок 3.7 – Примеры диаграмм, полученных при испытании образцов с односторонним покрытием на алюминиевой подложке

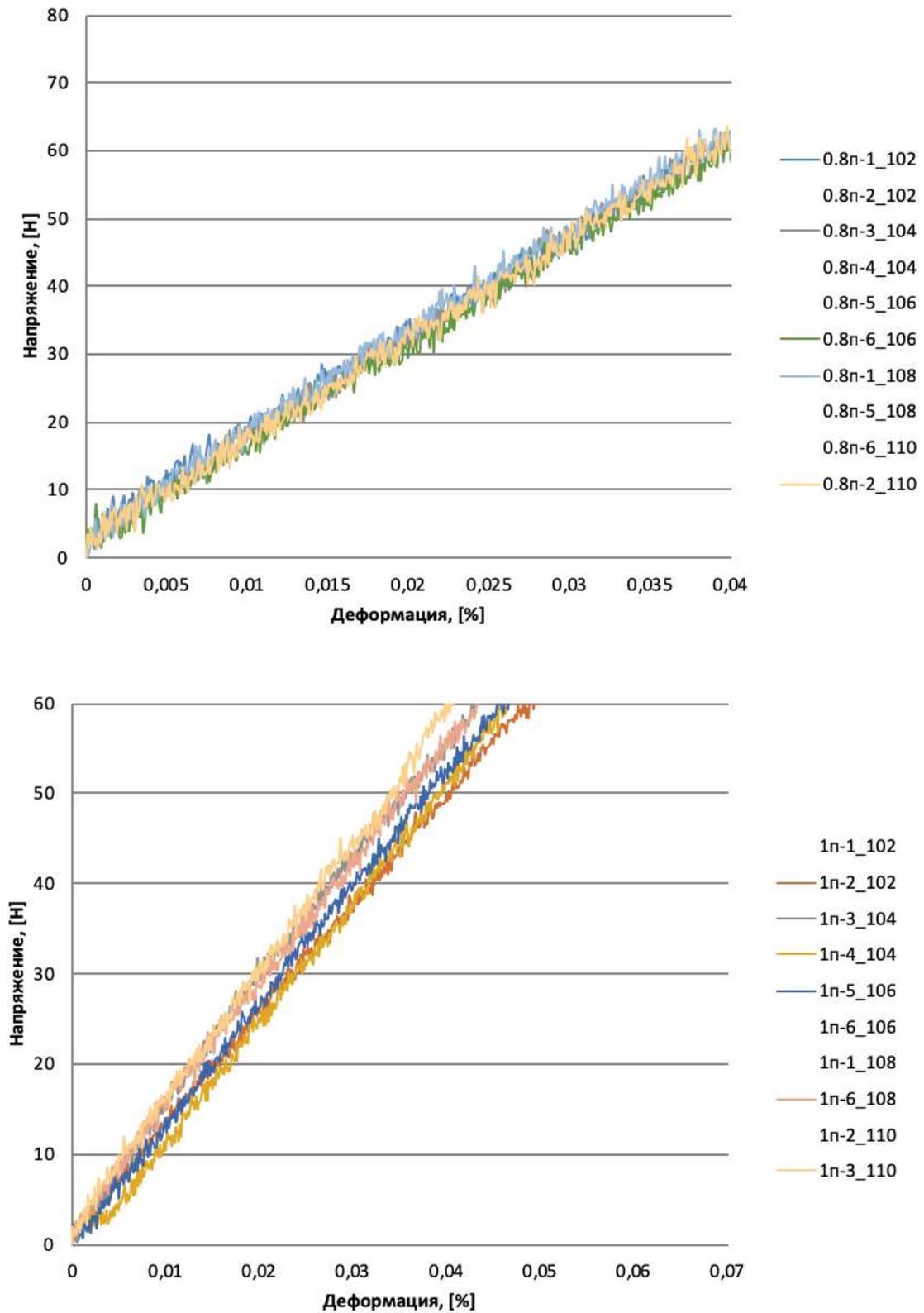


рисунок 3.8 – Примеры диаграмм, полученных при испытании образцов с односторонним покрытием на стальной подложке

4 ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ С ПОКРЫТИЯМИ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Испытания на растяжение также проводились на установке Instron 5969 при комнатной и повышенной температуре. Длина рабочей части образцов составляла 80 мм (рисунок 4.1.). Испытания проводились со скоростью 0,5 мм/мин на линейном этапе деформирования и со скоростью 3 мм/мин на этапе пластического деформирования и разрушения. В испытаниях применялся видеоэкстензометр с базой измерения 50 мм, поэтому диаграмма напряжения-деформации была построена с высокой точностью измерения деформаций вплоть до разрушения образцов. Характерный вид разрушенных образцов показан на рисунок 4.2. можно видеть отличие типа разрушения образцов с покрытиями и без.

Испытания при повышенной температуре проводились с использованием климатической камеры. Температура испытаний составляла 70 °С. Выдержка образцов при повышенной температуре после их установки в захватах и перед началом испытаний составляла 5 минут. В испытаниях на растяжение при повышенной температуре использовался контактный экстензометр с базой 25 мм.

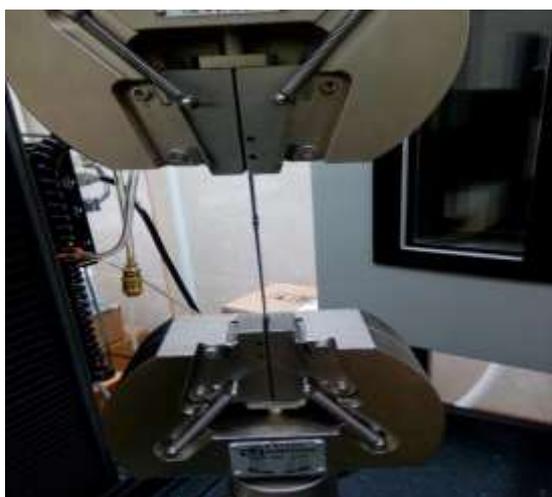


рисунок 4.1 – Образец в захватах и разрушение образца



рисунок 4.2 – Испытанные на растяжение образцы с/без покрытий

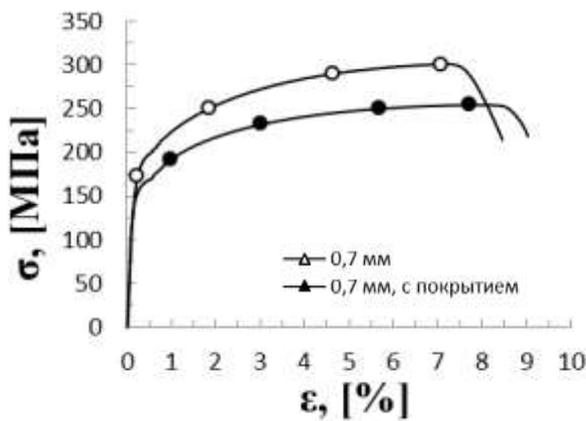
4.1 Результаты испытаний

Результаты испытаний на растяжение показаны в таблице 4.1 и на рисунке 4.3. Каждая представленная диаграмма получена осреднением экспериментальных данных для пяти однотипных образцов. Заметим, что стандартные значения предела прочности листов стали марки 08ПС могут лежать в пределах 275-390 МПа. Полученные в экспериментах значения предела прочности образцов без покрытий лежат в этих пределах (см. таблицу 4.1), причем чем больше толщина образца, тем выше его предел прочности, что определяется технологией изготовления листов стали различной толщины.

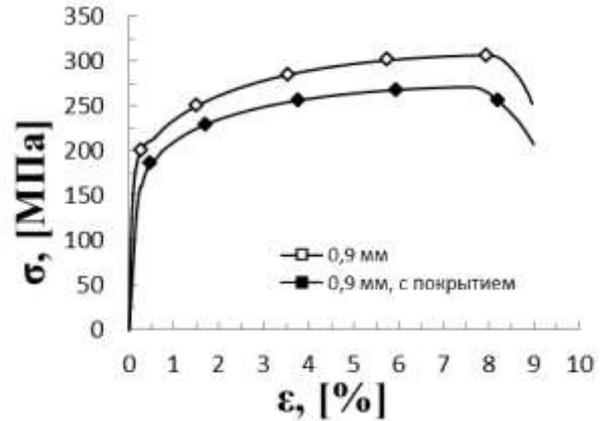
Влияние нагрева до 70 °С оказывается незначительным (см. таблица 4.1). В полученных результатах для пластин с покрытиями можно заметить, что нагрев приводит к повышению их предела прочности на 10-40 МПа, что может косвенно свидетельствовать о наличии соответствующего уровня остаточных напряжений в стальных подложках при комнатной температуре, которые релаксируют при нагреве.

Таблица 4.1 – Результаты испытаний растяжение

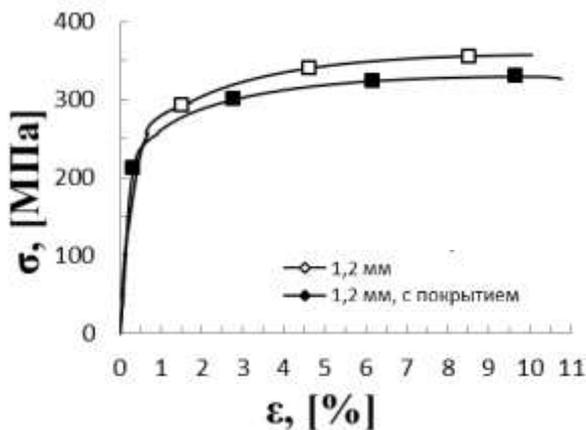
Образцы		σ_B , МПа (20 °С)	σ_B , МПа (70 °С)
0,7 мм	с покрытием	254	261
	без покрытия	301	289
0,9 мм	с покрытием	255	272
	без покрытия	307	307
1,2 мм	с покрытием	330	340
	без покрытия	357	357
1,5 мм	с покрытием	331	368
	без покрытия	396	400



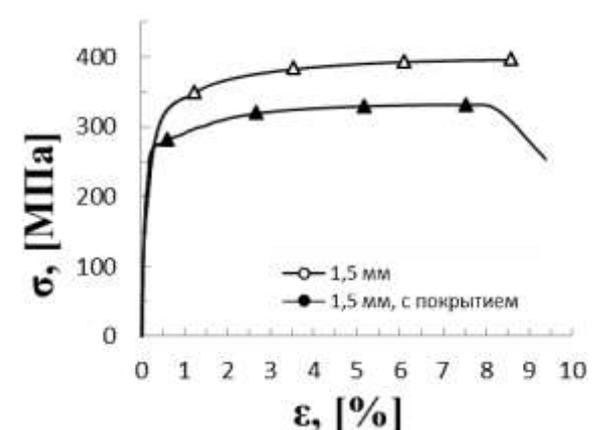
(а)



(б)



(в)



(г)

рисунок 4.3 – Диаграммы напряжения-деформации, полученные при испытании на растяжение образцов с подложками толщиной 0,7 мм (а), 0,9 мм (б), 1,2 мм (в) и 1,5 мм (г) с покрытиями и без покрытий

Влияние покрытия в испытаниях на растяжение сводится к снижению уровня определяемых средних напряжений (см. рисунок 4.3) 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. Это подтверждается и расчетами в следующем подразделе.

Из испытаний на растяжение также определялся предел прочности покрытий при растяжении. Для этого визуально устанавливался момент появления трещин на поверхности покрытия в процессе испытаний на растяжение. Уровень деформаций в этот момент составлял около 1%. Наличие оценки для модуля Юнга покрытия позволяет определить его предел прочности (совместность деформаций покрытия и подложки). На основе результатов, представленных в предыдущих главах, модуль Юнга покрытия оценивается в пределах 3 – 9 ГПа. Соответственно, предел прочности покрытия оценивается в пределах 30 – 90 МПа.

Кажущийся модуль упругости образцов в испытаниях на растяжение также, как и в испытаниях на изгиб, снижается. Его зависимость от относительной толщины подложки является линейной и определяется соотношением (3.4). Сопоставление экспериментальных данных для кажущегося модуля при растяжении и соотношения (3.4) показано на рисунке 4.4. Влияние модуля покрытия оказывается незначительным и разброс экспериментальных данных не позволяет идентифицировать свойства покрытия из испытаний на растяжение.

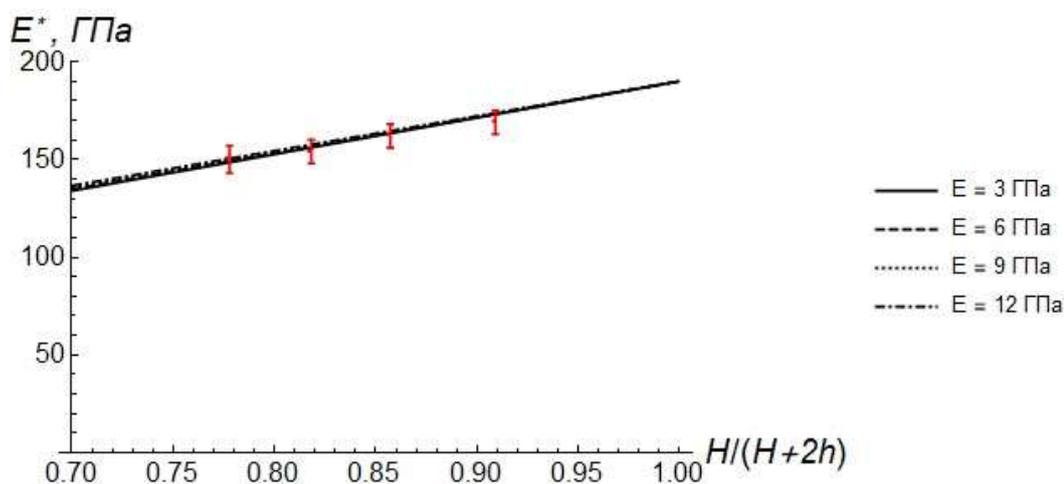
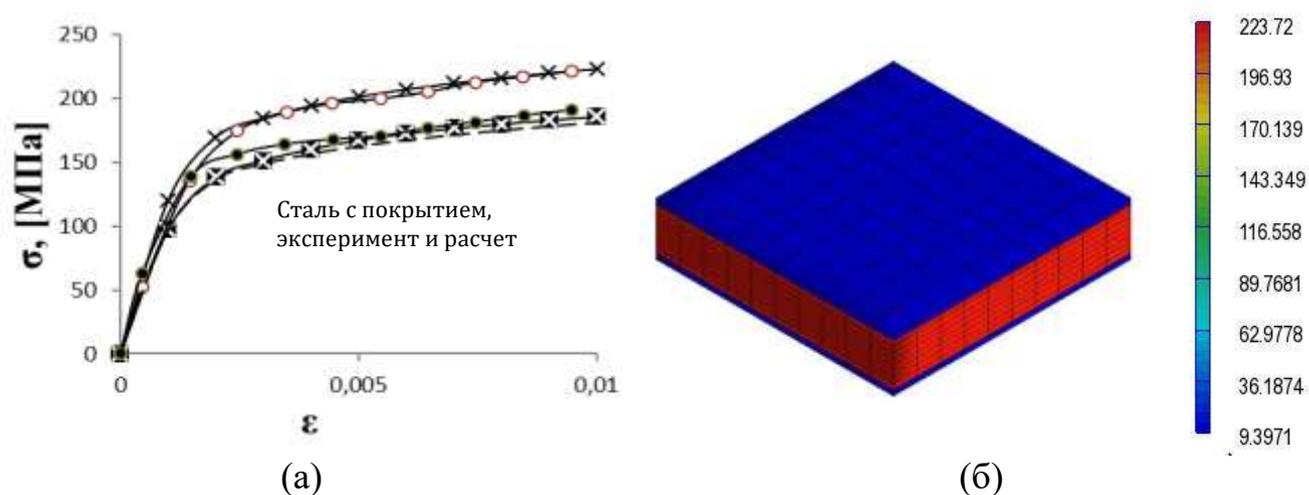


рисунок 4.4 – Сопоставление расчетных и экспериментальных данных для кажущегося модуля упругости пластин с покрытиями в испытаниях на растяжение

4.2 Моделирование одноосного растяжения образцов с покрытиями

На рисунке 4.5, а показано сопоставление экспериментальных и расчетных результатов, полученных при численном моделировании одноосного растяжения образцов толщиной 0,7 мм (рисунке 4.5, б). Для моделирования применялась система Digimat-FE (MSC), которая в численных расчетах использует конечно-элементный решатель программного комплекса Marc (MSC). В качестве исходных данных в расчет была заложена экспериментальная диаграмма напряжения-деформация для стальной подложки и упругие характеристики покрытия: коэффициент Пуассона 0,35 и модуль Юнга равный 1 ГПа, 3 ГПа или 6 ГПа. Для стали предполагался закон изотропного упрочнения и использовалась модель пластичности с критерием Мизеса. В расчетах задавалось одноосное напряженное состояние с пошаговым увеличением деформаций растяжения. На каждом шаге расчета система вычисляла возникающие во фрагменте средние напряжения и, таким образом, строилась диаграмма напряжения-деформации, которая сопоставлялась с экспериментальными данными. Расчет проводился до 1% деформаций, при которых материал полимерного покрытия деформируется в линейно-упругой зоне и не разрушается. Предполагалась совместность деформаций покрытия и подложки. Размер моделируемого фрагмента пластины

составлял 1×1 см. Из рисунка 4.5,а видно, что влияние собственных упругих свойств покрытий незначительно даже для рассмотренных в расчетах образцов с наименьшей толщиной 0,7 мм.



рисунки 4.5 – Сопоставление результатов моделирования и экспериментальных диаграмм для случая одноосного растяжения образцов толщиной 0,7 мм (а) и пример конечно-элементной модели представительного фрагмента образца с покрытием (б)

На цветовой шкале показан уровень максимальных нормальных напряжений, найденных в расчете при заданном модуле упругости покрытия 1 ГПа и при деформациях 1%.

5 ИСПЫТАНИЯ ПЛАСТИН С ПОКРЫТИЯМИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ СЖАТИИ

5.1 Методика испытаний и расчетов

В испытаниях на устойчивость использовались образцы из листовой прокатной стали марки 08ПС с постоянной толщиной 0,7мм и в зависимости от партии различной длиной и шириной (с или без покрытия). Были испытаны следующие партии:

- партия без покрытия с размером образца $240 \cdot 24 \cdot 0,7$;
- партия с покрытием и размером образца $240 \cdot 24 \cdot 1,2$;
- партия без покрытия с размером образца $120 \cdot 24 \cdot 0,7$;
- партия с покрытием и размером образца $120 \cdot 24 \cdot 1,2$;
- партия без покрытия с размером образца $120 \cdot 12 \cdot 0,7$;
- партия с покрытием и размером образца $120 \cdot 12 \cdot 1,2$.

Длина рабочей зоны у образцов длиной 240 мм составляла 132 мм, а у образцов длиной 120 мм – 86 мм. Образцы испытывались с постоянной скоростью 0,5 мм/мин. Для всех образцов использовались механические захваты. Испытания останавливались после появления явно выраженного нелинейного участка на диаграмме нагрузка-перемещения, при этом потеря устойчивости образца визуально всегда наблюдалась несколько раньше (отклонение диаграммы от линейной формы было незначительным).

Испытания проводились при комнатной и повышенной температуре 70 °С. Перед испытаниями при повышенной температуре образец выдерживался в камере 10 минут. Было установлено, что при испытаниях образцов с покрытиями при повышенной температуре необходимо проводить дополнительное подтягивание захватов испытательной машины после прогрева образца. В противном случае результаты испытаний оказывались значительно заниженными (рисунок 5.1). Возникновение такого эффекта следует объяснять влиянием эффекта температурного расширения покрытий, который приводит к ослаблению

усилия в захватах при нагреве. В образцах без покрытий подобного эффекта установлено не было, и они были испытаны без дополнительного подтягивания захватов (см. рисунок 5.1).

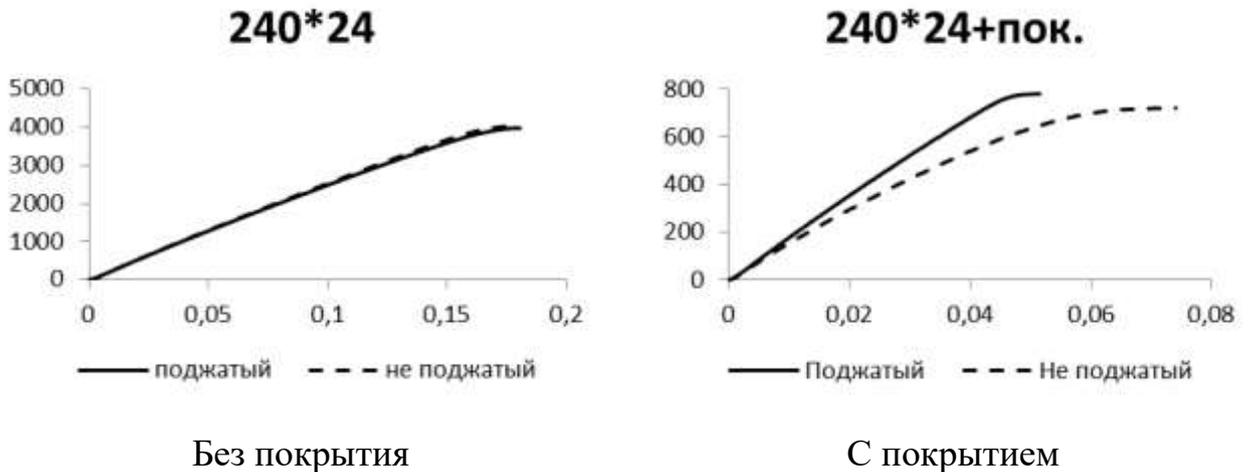


рисунок 5.1 – Результаты для партии образцов с условием подтягивания захватов в процессе прогрева

Теоретические значения критической нагрузки потери устойчивости $P_{кр}$ были найдены на основании известной формулы из теории устойчивости стержней для случая вертикального действия нагрузки и жесткого защемления концов стержня [77]:

$$P_{кр} = \frac{4\pi^2 EJ}{l^2}, \quad (5.1)$$

где $l = 86$ мм – длина стержня, E – модуль Юнга, J – момент инерции поперечного сечения стержня.

При моделировании пластин без покрытий принимаем $E = E_{ст}$ – модуль Юнга стали, $J = J_{ст} = bh^3/12$ – момент инерции образцов толщиной h и шириной b . При моделировании пластин с покрытиями жесткость соответствующего стержня при изгибе должна вычисляться с учетом дополнительного вклада от слоев покрытий: $EJ = 2E_n J_n + E_{ст} J_{ст}$, где E_n – модуль упругости покрытия, J_n – момент инерции слоев покрытий, смещенных относительно нейтральной линии стержня.

В расчетах были использованы следующие значения физико-механических свойств материалов:

Сталь листовая 08ПС:

- Модуль упругости $E = 190$ ГПа;
- Коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$;
- Коэффициент температурного расширения $\alpha = 12,5 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$.

Покрытие марки EUROPOLVERI:

- Модуль упругости $E = 3$ ГПа;
- Коэффициент Пуассона $\mu = 0,35$;
- Коэффициент температурного расширения $\alpha = 55 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$.

В дополнительно проведенных численных расчетах учитывалась возможная непрямолинейная форма образца путем задания начальной кривизны заданного радиуса. Численные расчеты проводились в модуле Ansys Transient Structural с учетом конечных деформаций. Образцы моделировались в виде слоистых пластин. В расчетах учитывалось влияние остаточных напряжений: нейтральное состояние образца задавалось соответствующим температуре 150°C (температура полимеризации покрытия), а расчеты проводились при заданной температуре 20°C и 70°C . Изменением модуля упругости и КТР материалов при изменении температуры пренебрегали.

Для задания изначальной непрямолинейной формы образцов в Ansys строилась поверхность с заданным радиусом кривизны (элемент цилиндрической поверхности). Выбирался достаточно большой радиус кривизны, который бы позволял рассматривать именно задачу устойчивости, а не сжатия криволинейного стержня. Для выбранных размеров образцов, оказалось, что радиус кривизны должен составлять не менее $1 \cdot 10^7$ мм (см. рисунок 5.2), что позволяет получить результат расчета (величину критической нагрузки потери устойчивости), независимой от этого параметра. Фактически, рассматриваются прямолинейные образцы, но с очень малым отклонением от идеальной формы. В случае нестационарного расчет это обеспечивает возможность моделирования эффекта потери устойчивости.

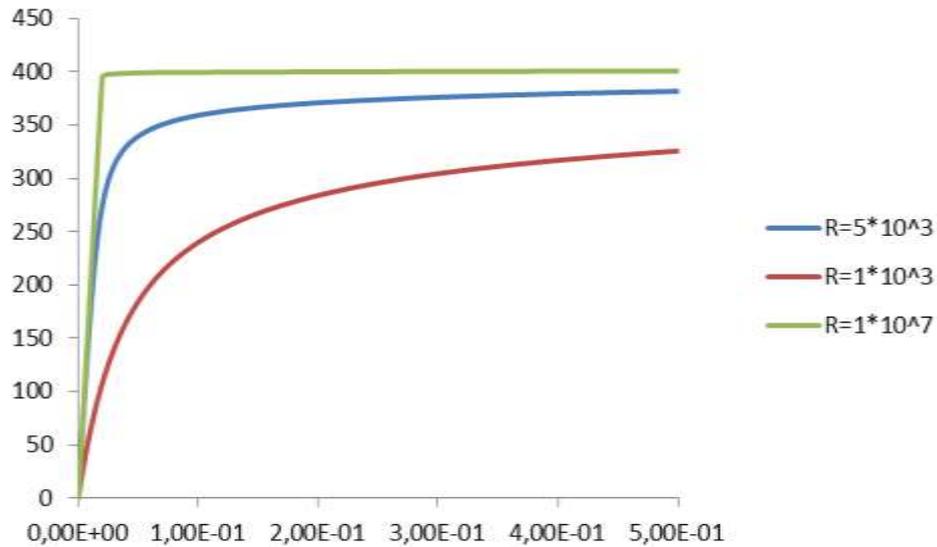


рисунок 5.2 – Диаграммы нагрузка – перемещения при сжатии (и потере устойчивости) пластин

Диаграммы получены в результате численных расчетов для почти-прямолинейных образцов размером 120·12мм с различными значениями радиуса кривизны.

Для моделирования закрепления аналогичного эксперименту были заданы граничные условия (рисунок 5.3): на нижней грани были заданы условия заделки (запрет перемещений и поворотов по всем направлениям). На верхней грани ставились условия запрещения перемещений в направлении ширины Ox и толщины Oz образца, а так же поворот вокруг направления ширины образца Rx . Нагрузка задавалась на верхнюю грань по оси Oy в виде силы.

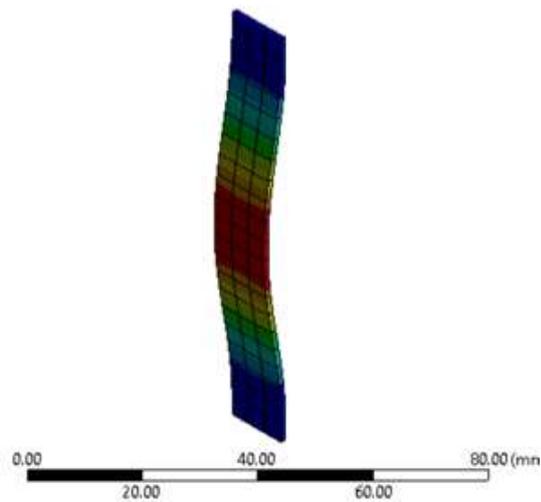
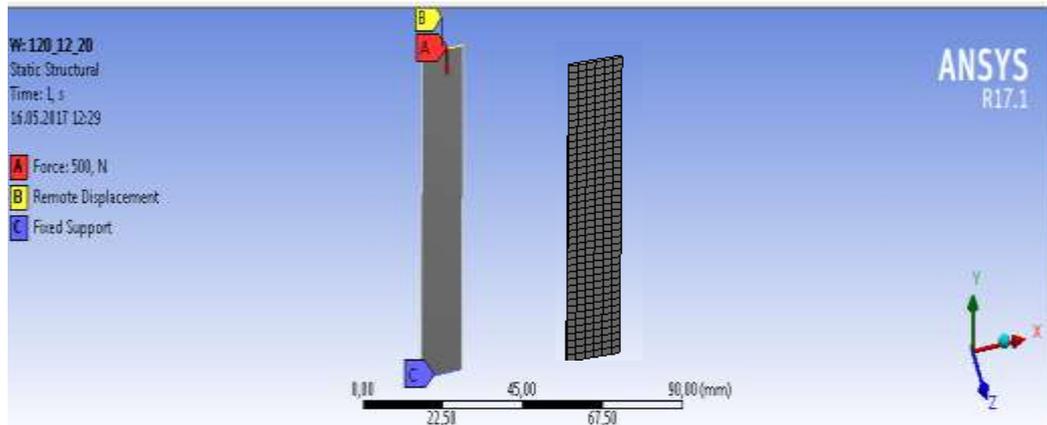


рисунок 5.3 – Конечно-элементная модель с заданными граничными условиями и нагрузкой (вверху) и образец, потерявший устойчивость (внизу)

5.2 Результаты испытаний

Результаты испытаний образцов при различной температуре показаны на рисунке 5.4 и в таблице 5.1. Из этих результатов следует, что наличие покрытия приводит к незначительному повышению несущей способности пластин в закритической области деформирования. Особенно этот эффект проявляется для более длинных и широких образцов. Для малоразмерных образцов эффект изменения критической нагрузки потери устойчивости, фактически, не возникает. Влияние температуры на критическую нагрузку также оказывается незначительным.

Таблица 5.1 – Критическая сила, найденная в испытаниях образцов различного размера при комнатной и повышенной температуре

№	Протия	$R_{\min_{кр}}$	$R_{\max_{кр}}$	$R_{ср_{кр}}$
1.	120*12_20С	400	450	415
2.	120*12_20С + покр	374	451	415
3.	120*12_80С	306	431	400
4.	120*12_80С + покр	400	450	428
5.	120*24_20С	920	958	940
6.	120*24_20С + покр	960	1028	985
7.	120*24_80С	895	995	905
8.	120*24_80С + покр	948	1037	986
9.	240*24_20С	372	393	384
10.	240*24_20С + покр	443	464	450
11.	240*24_80С	358	383	365
12.	240*24_80С + покр	392	433	408

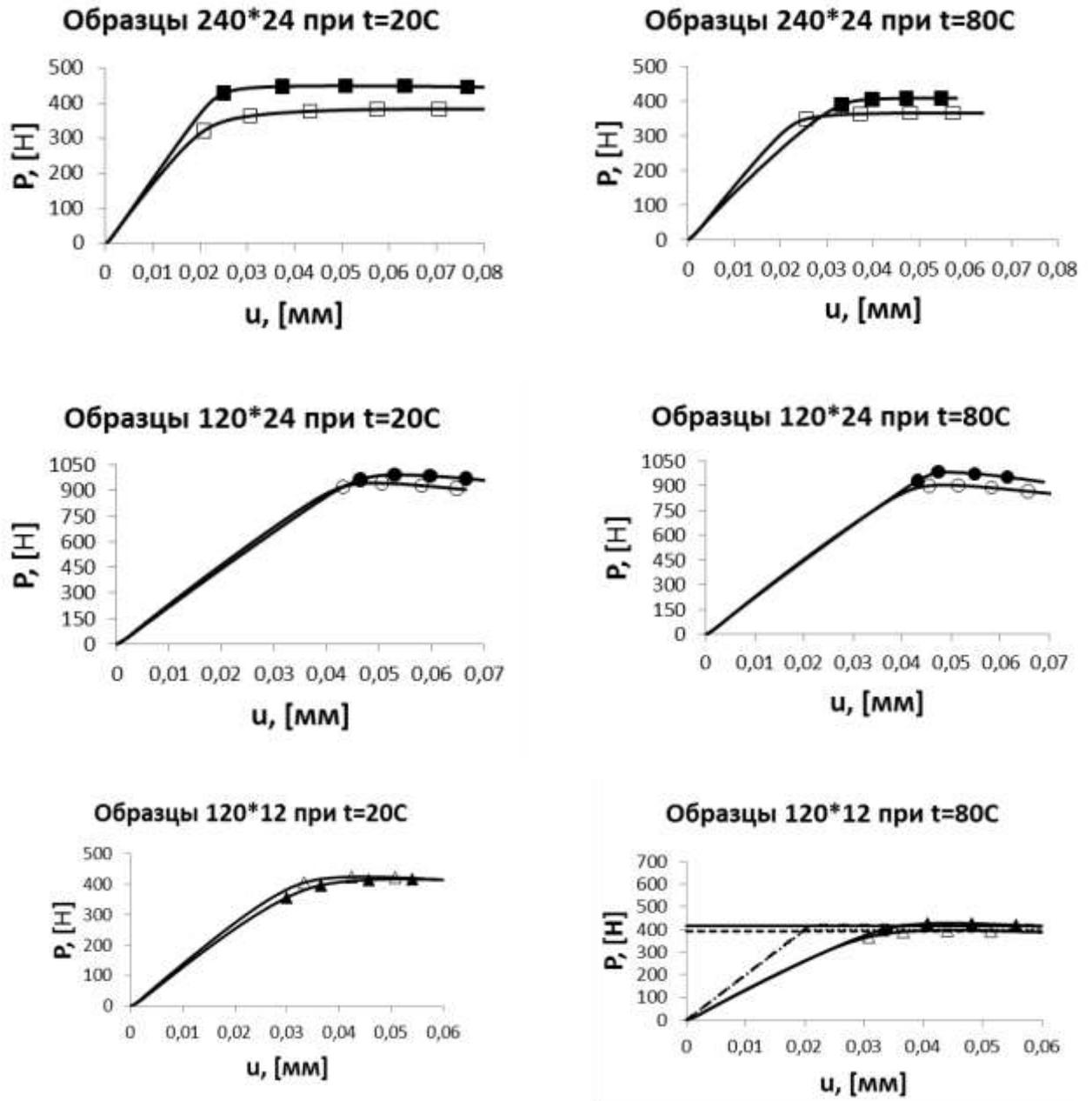


рисунок 5.4 – Результаты испытаний образцов на устойчивость при комнатной и повышенной температуре

5.3 Моделирование результатов испытаний

Сопоставление результатов численного и аналитического моделирования устойчивости пластин с покрытием и экспериментальных данных представлено на рисунке 5.5-5.7. Показано, что аналитические расчеты по формуле Эйлера (горизонтальные пунктирные линии) и численное моделирование (штриховые диаграммы) хорошо согласуются друг с другом и достаточно хорошо согласуются

с экспериментом в отношении прогноза критической нагрузки. Результаты расчетов подтверждают, что наличие покрытия незначительно влияет на уровень критической нагрузки. Не совпадение угла наклона линейного участка экспериментальных диаграмм и диаграмм, полученных в Ansys, объясняется тем, что эксперимент проводился без экстензометра и перемещения измерялись по перемещению траверсы, что привело к завышению значений перемещений.

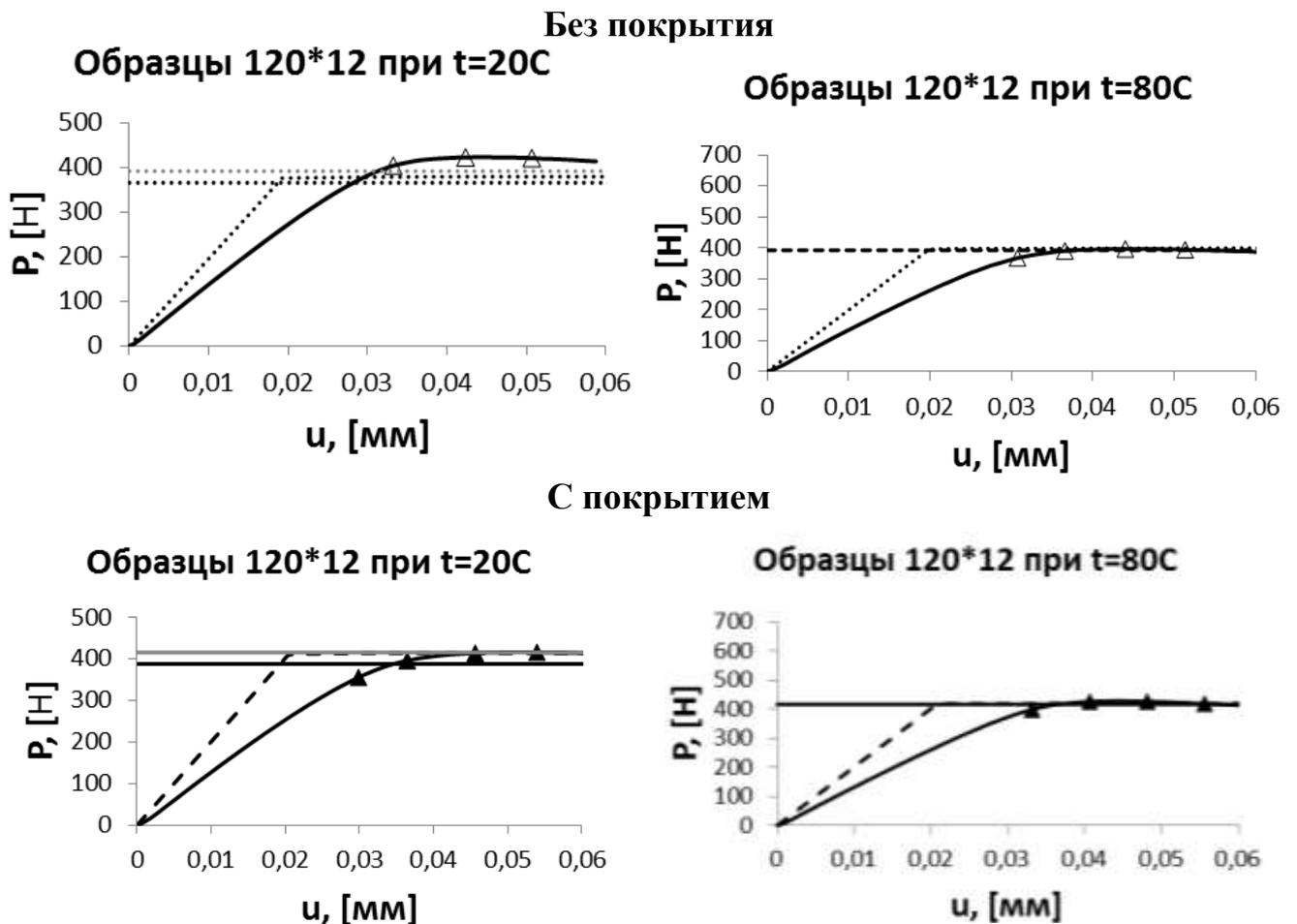
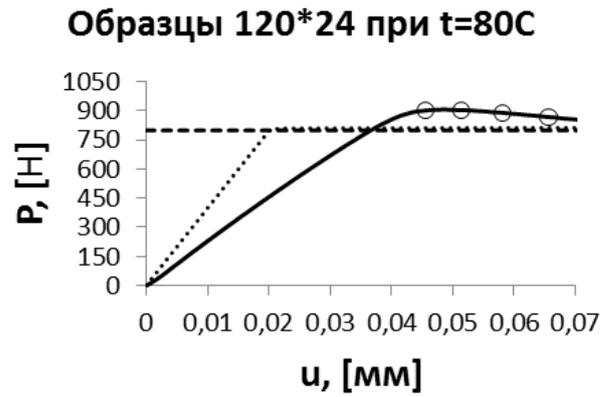
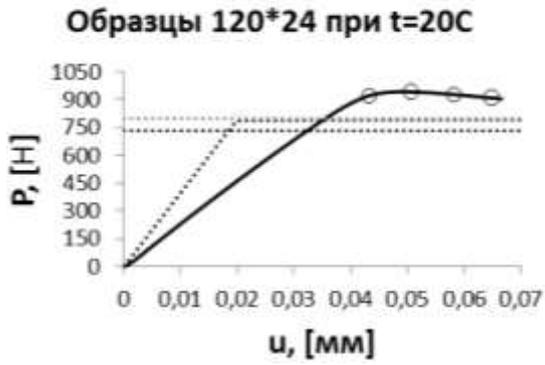


рисунок 5.5 – Результаты моделирования и испытания образцов размером 120x12

Без покрытия



С покрытием

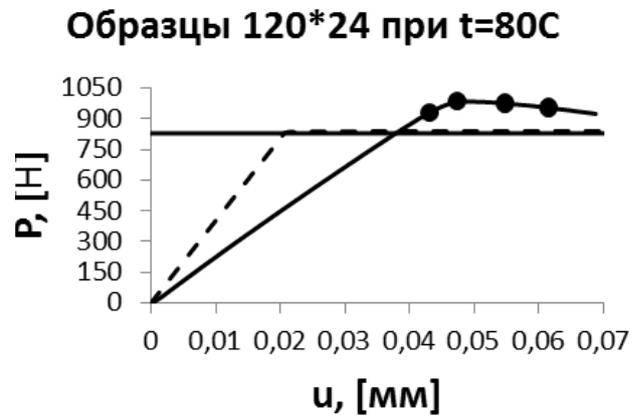
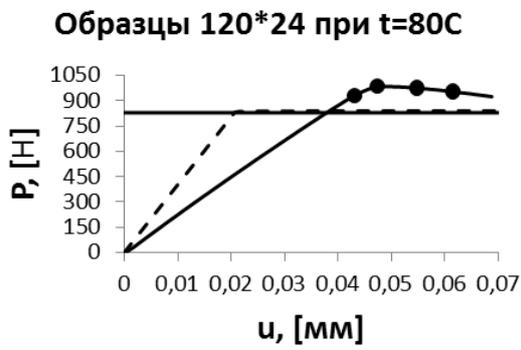
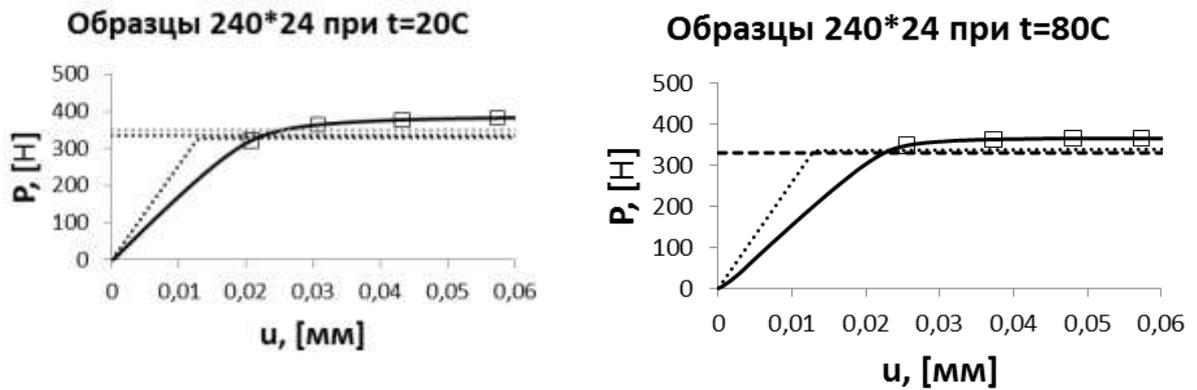


рисунок 5.6 – Результаты моделирования и испытания образцов размером 120x24

Без покрытия



С покрытием

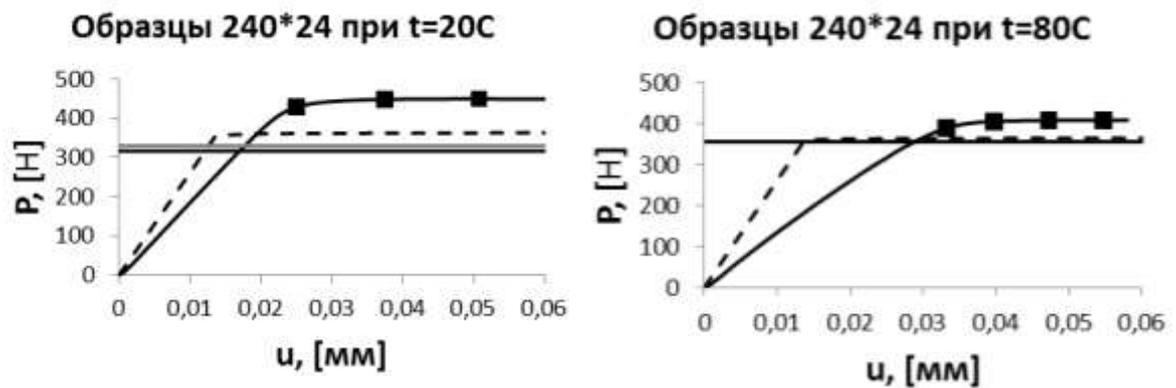


рисунок 5.7 – Результаты моделирования и испытания образцов размером 240x24

Как видно из графиков, влияние покрытия сводится к незначительному увеличению критической силы, что подтверждается классическим анализом в рамках сопротивления материалов и численным моделированием. Результаты по всем экспериментам расчетам представлены в таблице 5.2. Процентное отклонение результатов расчетов от экспериментальных данных дано в таблице 5.3. Наилучший результат дает применение модуля Ansys Eigenvalue buckling.

Таблица 5.2 – Сопоставление экспериментальных и расчетных значений для критической нагрузки, Н

№	Наименование партии	Эксперимент	Ф-ла Эйлера	Ansys Transient	Ansys Eigenvalue buckling
1.	120*12_20С	424	366	382	392
2.	120*12_20С + покр	416	388	415	415
3.	120*12_80С	396	–	401	392
4.	120*12_80С + покр	428	–	423	416
5.	120*24_20С	944	732	809	799
6.	120*24_20С + покр	991	777	857	825
7.	120*24_80С	906	–	813	798
8.	120*24_80С + покр	987	–	841	828
9.	240*24_20С	384	316	333	330
10.	240*24_20С + покр	450	335	365	350
11.	240*24_80С	365	–	341	330
12.	240*24_80С + покр	408	–	367	356

Таблица 5.3 – Отклонение расчетов от экспериментальных данных

№	Наименование партии	Ф-ла Эйлера	Ansys Transient	Ansys Eigenvalue buckling
1.	120*12_20С	14%	10%	8%
2.	120*12_20С + покр	7%	0%	0%
3.	120*12_80С	-	-1%	1%
4.	120*12_80С + покр	-	1%	3%
5.	120*24_20С	22%	14%	15%
6.	120*24_20С + покр	22%	14%	17%
7.	120*24_80С	-	10%	12%
8.	120*24_80С + покр	-	15%	16%
9.	240*24_20С	18%	13%	14%
10.	240*24_20С + покр	26%	19%	22%
11.	240*24_80С	-	7%	10%
12.	240*24_80С + покр	-	10%	13%

5.4 Испытания на устойчивость после изгиба

Дополнительно, были проведены испытания образцов, подвергнутых предварительному трехточечному изгибу. Испытания на изгиб проводились один раз для каждого образца в упругой области деформирования. После проведения испытаний в образцах остаточных деформаций визуально не наблюдалось. Результаты испытаний пластин на потерю устойчивости при сжатии представлены в таблице 5.4 и на рисунке 5.4 – 5.7. Каждая диаграмма на этих рисунках получена осреднением экспериментальных данных по пяти однотипным образцам. Нижний конец образцов фиксировался неподвижно в захвате испытательной машины, а к верхнему концу прикладывалась сжимающая вертикальная нагрузка, также через жесткую фиксацию в захвате. В эксперименте были реализованы граничные условия, соответствующие жесткому защемлению

концов пластин. Показаны найденные зависимости перемещений верхних концов образцов (перемещения траверсы испытательной машины) от уровня прикладываемой сжимающей нагрузки. Видно, что в условиях закритического деформирования, диаграммы образцов без покрытий лежат значительно выше, по сравнению с диаграммами для образцов с покрытиями. Различие в поведении образцов оказывается минимальным для случая их наибольшей толщины (рисунок 5.8, г) и максимальным для тонких образцов (рисунок 5.8, а и б), что является закономерным.

Теоретическая оценка критической нагрузки по формуле Эйлера показана горизонтальным пунктиром. Показан расчет для образца без покрытия. Учет влияния покрытия, как было показано раньше в формуле Эйлера не приводит к значительному изменению прогнозируемой величины критической нагрузки. Использование такой уточненной оценки приводит к незначительному изменению вычисляемой критической нагрузки (в пределах 2%), которое не может объяснить полученные экспериментальные данные.

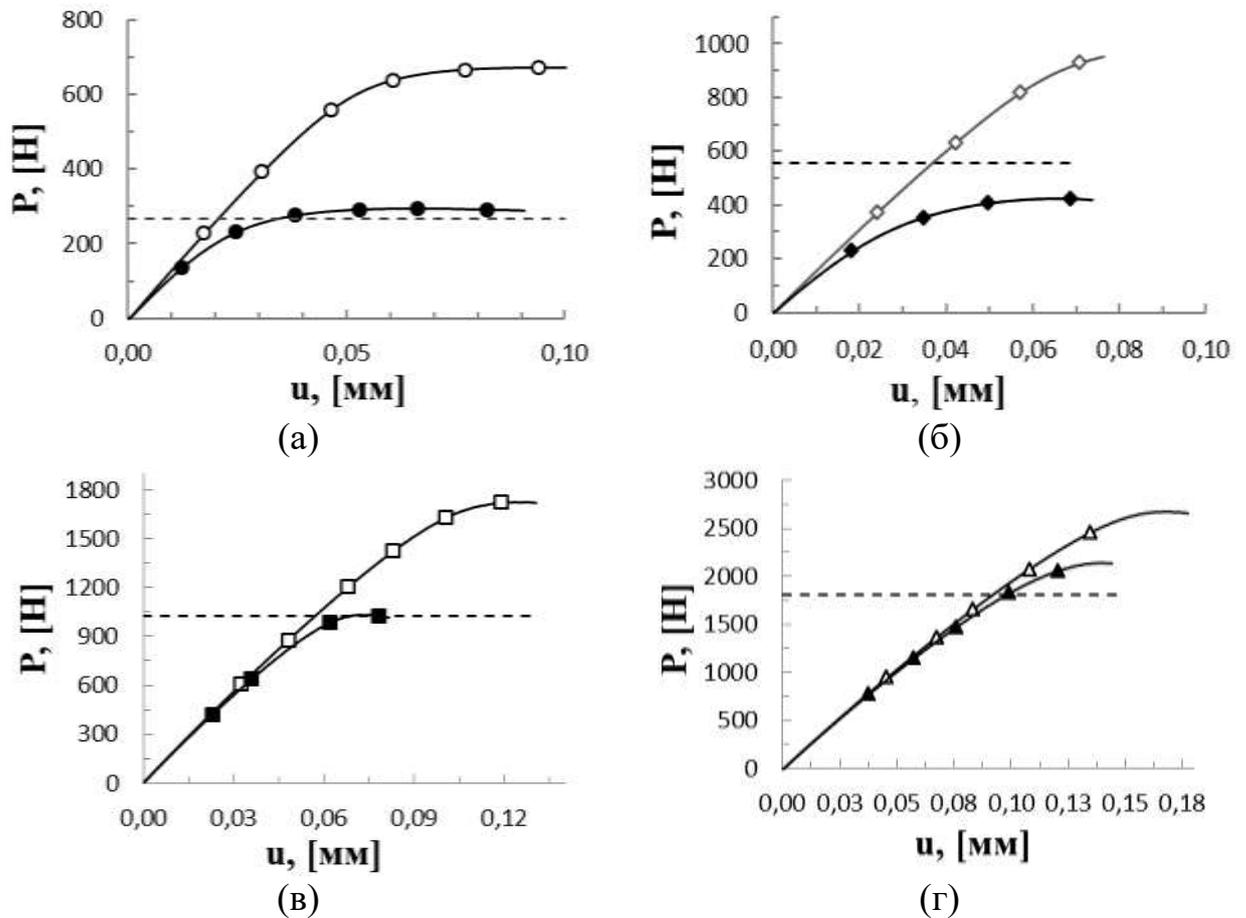


рисунок 5.8 – Результаты испытаний на потерю устойчивости при сжатии образцов, подвергнутых предварительному изгибу

Толщины стальной подложки: (а): 0,7 мм; (б): 0,9 мм; (в): 1,2 мм; (г): 1,5 мм

Пунктиром показано теоретическое значение критической нагрузки потери устойчивости.

При изгибе происходит частичное изменение структуры покрытий и характера их контакта с подложкой, что приводит к несимметричному напряженно-деформированному состоянию образца в испытаниях на потерю устойчивости при сжатии. В результате снижается критическая нагрузка для образцов с покрытиями.

6 ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ В ПОКРЫТИЯХ

Рассмотрим задачу об определении остаточных напряжений, действующих в образцах с односторонним покрытием. Такие образцы были исследованы в главе 4 при идентификации модуля Юнга покрытий. Для оценки действующих в них остаточных напряжений необходимо учитывать возникающий изгиб. При этом величина действующих остаточных напряжений представима в виде суммы напряжений, возникающих в образцах без изгиба и напряжений, связанных с изгибом:

$$\left({}^F \sigma_X \right)_{c,s} = \left(\sigma_X^0 \right) + \left({}^A \sigma_X \right)_{c,s} = \left(\sigma_X^0 \right)_c + E_{c,s} \times \left(\varepsilon_X \right)_{c,s},$$

где использован закон Гука для материала покрытия и подложки для выражения напряжений, связанных с изгибом.

В рамках классической теории изгиба балок деформации в слоях образца определяются соотношением:

$$\left(\varepsilon_X \right)_{c,s} = \frac{Z_0 - Z}{R}.$$

То есть остаточные напряжения в слоях:

$$\left({}^F \sigma_X \right)_{c,s} = \left(\sigma_X^0 \right)_c + E_{c,s} \times \frac{Z_0 - Z}{R}.$$

Система остаточных температурных напряжений всегда является самоуравновешенной и в любом сечении рассматриваемого образца должна удовлетворять уравнениям равновесия по продольным результирующим усилиям и по изгибающим моментам:

$$\sum_n F_n = 0 \Rightarrow \int_S \left({}^F \sigma_X \right)_{c,s} dS = 0,$$

$$\sum_n M_n = 0 \Rightarrow \int_S \left({}^F \sigma_X \right)_{c,s} Z dS = 0,$$

Где $dS = b dZ$ – элемент площади поперечного сечения образца.

Подставляя в уравнения равновесия найденные значения для напряжений, получим:

$$\frac{E_c b_c}{R} \int_{-h_c}^0 (Z_0 - Z) dZ + b_c \int_{-h_c}^0 (\sigma_x^0)_c dZ + \frac{E_s b_s}{R} \int_0^{h_s} (Z_0 - Z) dZ = 0,$$

$$\frac{E_c b_c}{R} \int_{-h_c}^0 (Z_0 - Z) Z dZ + b_c \int_{-h_c}^0 (\sigma_x^0)_c Z dZ + \frac{E_s b_s}{R} \int_0^{h_s} (Z_0 - Z) Z dZ = 0.$$

Из первого уравнения (по усилиям) определяем координату расположения нейтральной линии балки:

$$Z_0 = -\frac{(\sigma_x^0)_c S_c R}{E_c S_c + E_s S_s} + \frac{1}{2} \frac{E_s S_s h_s - E_c S_c h_c}{E_c S_c + E_s S_s}.$$

Подставляя найденное значение координаты нейтральной оси в уравнение равновесия по моментам, определяем значение остаточных напряжений, действующих в слое покрытия:

$$(\sigma_x^0)_c = -\frac{E_c^2 S_c^2 h_c^2 + 2E_c S_c E_s S_s (2h_c^2 + 3h_c h_s + 2h_s^2) + E_s^2 S_s^2 h_s^2}{6E_s (h_c + h_s) S_c S_s R},$$

которое может быть переписано следующим образом:

$$(\sigma_x^0)_c = -\frac{E_s h_s^2}{6h_c R} \times \left[1 + \beta(4\alpha - 1) + \beta^2 \left[\alpha^2(\beta - 1) + 4\alpha + \frac{(1 - \alpha)^2}{1 + \beta} \right] \right] \quad (6.1)$$

где $\alpha = E_c / E_s$, $\beta = h_c / h_s$.

Полученное решение является обобщением известных оценок по формуле Стоуни (в случае $\beta = 0$):

$$(\sigma_x^0)_c = -\frac{E_s h_s^2}{6h_c R} \quad (6.2)$$

и Ролля (без учета степеней β выше первой):

$$(\sigma_x^0)_c = -\frac{E_s h_s^2}{6h_c R} \times [1 + \beta(4\alpha - 1)] \quad (6.3)$$

Дополнительное уточнение решения (6.1) может быть получено, если учесть, что образец с покрытием работает, как пластина, и вместо модулей Юнга слоев использовать приведенные модули Юнга. Тогда получим:

$$(\sigma_x^0)_c = -\frac{E_s h_s^2}{6h_c(1-\nu_s)R} \times \left[1 + \beta(4\alpha^* - 1) + \beta^2 \left[\alpha^{*2}(\beta - 1) + 4\alpha^* + \frac{(1 - \alpha^*)^2}{1 + \beta} \right] \right] \quad (6.4)$$

$$\text{где } \alpha^* = \frac{E_c(1-\nu_s)}{E_s(1-\nu_c)}.$$

Частным случаем случая выражения (6.4) являются формулы Стоуни и Роля для пластин с покрытиями:

$$(\sigma_x^0)_c = -\frac{E_s h_s^2}{6h_c(1-\nu_s)R}, \quad (6.5)$$

$$(\sigma_x^0)_c = -\frac{E_s h_s^2}{6h_c(1-\nu_s)R} \times [1 + \beta(4\alpha^* - 1)]. \quad (6.6)$$

Дополнительное уточнение полученных оценок остаточных напряжений можно получить, если учесть деформации образцов в собственной плоскости. Используя закон Гука:

$$\sigma_c = -\frac{E_c}{(1+n)} \Delta \varepsilon_f = -\frac{E_c}{(1+n)} (\varepsilon_{fc} - \varepsilon_{fc}),$$

$$\text{где } n = \frac{h_c}{h_s} \times \frac{E_c}{E_s} = \alpha\beta.$$

С учетом деформаций в виде:

$$\Delta \varepsilon_f = \frac{(h_c + h_s)}{R} \frac{\beta^4 \alpha^2 + 4\beta^3 \alpha + 6\beta^2 \alpha + 4\beta \alpha + 1}{6\alpha\beta(1 + \beta)^2},$$

находим

$$\sigma_c = (\sigma_x^0)_c = -\frac{E_s h_s^2}{6h_c R} \times \frac{1}{(1 + \alpha\beta)} \times \left[1 + \beta(4\alpha - 1) + \beta^2 \left[\alpha^2(\beta - 1) + 4\alpha + \frac{(1 - \alpha)^2}{1 + \beta} \right] \right].$$

Учитывая поведения образца как пластинки, через введение приведенных модулей получим аналогичное выражение:

$$(\sigma_x^0)_c = \frac{E_s h_s^2}{6h_c(1-\nu_s)R} \times \frac{1}{(1+\alpha^*\beta)} \times \left[1 + \beta(4\alpha^* - 1) + \beta^2 \left[\alpha^{*2}(\beta - 1) + 4\alpha^* + \frac{(1-\alpha^*)^2}{1+\beta} \right] \right].$$

Найденные значения остаточных напряжений для партий образцов, описанных в главе 4 представлено в таблицах 6.1, 6.2.

Результаты расчета образцов с алюминиевыми подложками по каждой из представленных моделей представлены в таблице 6.1. Результаты расчета стальных – в таблице 6.2. Напряжения указаны в паскалях. Полученные значения соответствуют типичным значениям единиц и десятков мегапаскалей, которые могут реализовываться в рассматриваемых материалах без образования трещин и разрушения. Полученные оценки могут и примененные расчетные подходы могут быть использованы для оценки долговечности защитных покрытий, а также для уточнения параметров их износостойкости.

Таблица 6.1 – Остаточные напряжения в покрытиях на алюминиевой подложке, Па

Номер образца	Номер модели								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1-3	1,56E+06	1,86E+06	1,42E+06	2,35E+06	2,78E+06	1,54E+06	1,54E+06	2,31E+06	2,31E+06
1-13	6,36E+06	7,60E+06	5,77E+06	9,57E+06	1,13E+07	6,27E+06	6,27E+06	9,43E+06	9,43E+06
1-8	1,53E+06	1,83E+06	1,39E+06	2,30E+06	2,72E+06	1,51E+06	1,51E+06	2,27E+06	2,27E+06
1-25	1,99E+06	2,38E+06	1,81E+06	3,00E+06	3,56E+06	1,97E+06	1,97E+06	2,96E+06	2,96E+06
1-15	7,48E+06	8,94E+06	6,79E+06	1,13E+07	1,33E+07	7,38E+06	7,38E+06	1,11E+07	1,11E+07
2-11	2,40E+06	2,93E+06	2,09E+06	3,62E+06	4,38E+06	2,36E+06	2,36E+06	3,56E+06	3,56E+06
2-8	8,96E+05	1,14E+06	6,11E+05	1,37E+06	1,71E+06	8,73E+05	8,73E+05	1,33E+06	1,33E+06
2-9	1,99E+06	2,53E+06	1,50E+06	3,03E+06	3,77E+06	1,95E+06	1,95E+06	2,95E+06	2,95E+06
2-17	2,03E+06	2,60E+06	1,31E+06	3,10E+06	3,88E+06	1,97E+06	1,97E+06	3,00E+06	3,00E+06
2-18	1,74E+06	2,23E+06	1,06E+06	2,66E+06	3,33E+06	1,69E+06	1,69E+06	2,58E+06	2,58E+06
2-28	7,19E+05	9,21E+05	4,03E+05	1,10E+06	1,38E+06	6,97E+05	6,97E+05	1,07E+06	1,07E+06

Таблица 6.2 – Остаточные напряжения в покрытиях на стальной подложке, Па

Номер образца	Номер модели								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,8п-1	3,79E+07	4,21E+07	3,74E+07	5,67E+07	6,28E+07	3,78E+07	3,78E+07	5,65E+07	5,65E+07
0,8п-2	2,35E+07	2,61E+07	2,32E+07	3,51E+07	3,90E+07	2,35E+07	2,35E+07	3,51E+07	3,51E+07
0,8п-3	3,17E+07	3,52E+07	3,12E+07	4,73E+07	5,26E+07	3,16E+07	3,16E+07	4,72E+07	4,72E+07
0,8п-4	2,07E+06	2,30E+06	2,04E+06	3,09E+06	3,43E+06	2,06E+06	2,06E+06	3,08E+06	3,08E+06
0,8п-5	1,61E+07	1,78E+07	1,59E+07	2,40E+07	2,66E+07	1,61E+07	1,61E+07	2,40E+07	2,40E+07
0,8п-6	1,12E+05	1,25E+05	1,10E+05	1,67E+05	1,86E+05	1,12E+05	1,12E+05	1,67E+05	1,67E+05
1п-1	2,59E+07	2,81E+07	2,56E+07	3,86E+07	4,19E+07	2,58E+07	2,58E+07	3,86E+07	3,86E+07
1п-2	2,11E+06	2,28E+06	2,09E+06	3,15E+06	3,41E+06	2,10E+06	2,10E+06	3,14E+06	3,14E+06
1п-3	4,40E+07	4,79E+07	4,36E+07	6,58E+07	7,14E+07	4,40E+07	4,40E+07	6,57E+07	6,57E+07
1п-4	1,42E+07	1,54E+07	1,41E+07	2,12E+07	2,30E+07	1,42E+07	1,42E+07	2,12E+07	2,12E+07
1п-5	2,15E+06	2,33E+06	2,13E+06	3,21E+06	3,48E+06	2,14E+06	2,14E+06	3,20E+06	3,20E+06
1п-6	4,49E+06	4,88E+06	4,45E+06	6,71E+06	7,28E+06	4,48E+06	4,48E+06	6,70E+06	6,70E+06

7 ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Одним из важных параметров, определяющих долговечность и качество защитных покрытий, является прочность их контакта с подложкой. Можно выделить два основных механизма нарушения адгезионной прочности покрытий, которые связаны с их отрывом от подложки (действие нормальных напряжений) и со срезом (действие касательных напряжений). Соответственно, можно ввести и экспериментально определять две характеристики прочности на отрыв и срез. Однако, в реальных изделиях возможна работа покрытий в условиях сложного напряженного состояния, при котором происходит одновременное нагружение, как касательными, так и нормальными напряжениями. В этом случае представляет интерес знание достоверных критериев прочности, позволяющих оценить прочность контакта покрытий с подложкой для произвольного напряженного состояния. В данном разделе диссертации 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.

7.1 Аналитическая оценка прочности покрытия в условиях испытаний на отрыв консольно-закрепленного образца

Рассмотрим вариант испытаний образцов в виде тонких металлических пластин (полос) с покрытиями, закрепленных одним концом на жесткой подложке (рисунок 7.1). 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 то время как жесткая подложка фиксируется на нижней поверхности. Таким образом, обеспечивается отрыв пластики 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 ($x = L - a$). Проведем расчет для оценки этих напряжений. В расчетах будем считать, что толщиной покрытия h_c и клеевого соединения h_a можно пренебречь и рассматривать задачу о деформациях балки толщиной h , закрепленной одним концом на стальной подложке толщиной H . Перерезывающая сила и изгибающий момент, возникающие в балке, определяют уровень напряжений на границе ее контакта с подложкой и, соответственно, искомый уровень напряжений в покрытии.

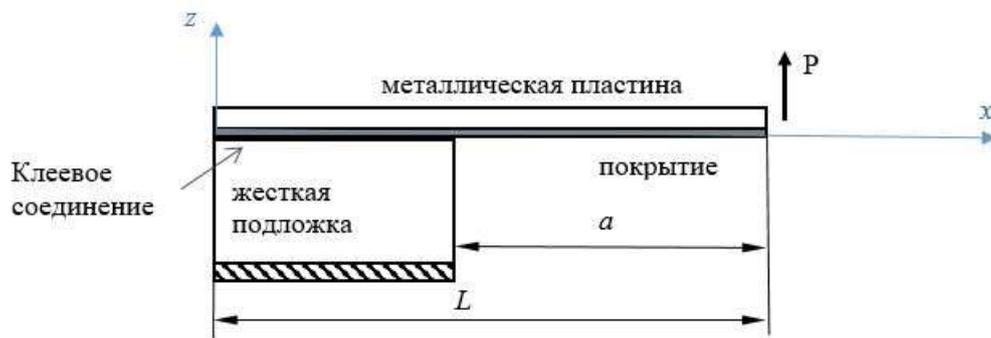


рисунок 7.1 – Схема испытания образца с покрытием, консольно закрепленного на жесткой подложке

Длина консольной балки, выступающей за жесткую подложку составляет a . Поэтому момент и перерезывающая сила, действующие в точке отрыва, составляют:

$$\begin{aligned} M(L - a) &= Pa, \\ Q(L - a) &= P. \end{aligned} \tag{7.1}$$

В зоне закрепления $x < L - a$ прогибы балки и ее кривизна остаются нулевыми, и, следовательно, в рамках классической балочной теории, в этой области в балке нулю равны и момент, и перерезывающая сила. Таким образом, с точки зрения классической теории в зоне закрепления балка находится в ненапряженном состоянии, и только на границе зоны закрепления к ней приложен сосредоточенный изгибающий момент и перерезывающая сила (эпюры скачком изменяются от нулевых значений до (7.1), соответственно). Таким образом, классическая теория не позволяет оценить уровень напряжений, действующий в зоне контакта балки с жесткой подложкой.

Более приемлемые оценки для рассматриваемой задачи можно получить, рассматривая модель балки типа Тимошенко. Эта модель также является некоторым приближением к реальному деформированному состоянию балки, которое, вообще говоря надо описывать с учетом эффектов обжатия [78]. Разрешая сдвиговые деформации в балке, возможно оценить, как изменяется ее напряженно деформированное состояние в зоне закрепления, где не возникает прогибов и кривизна остается нулевой (сдвиги, при этом допустимы: нижняя поверхность балки остается в полном контакте с жесткой подложкой, а верхняя сдвигается относительно нижней из-за действия внешней приложенной нагрузки, передаваемой от свободного конца балки).

В случае малых прогибов, кривизна балки в рамках модели Тимошенко определяется следующим соотношением [79]:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M}{EI} - \frac{5}{6GF} \frac{dQ}{dx}$$

где $y(x)$ – прогибы балки, $M(x)$ – изгибающий момент, $Q(x)$ – перерезывающая сила, E – модуль Юнга материала балки (металлического образца, в данном случае), G – модуль сдвига балки, $I = bh^3 / 12$ – момент инерции сечения балки, $F = bh$ площадь поперечного сечения, $5/6$ – поправочный коэффициент, вводимый в теории Тимошенко [80], штрихом обозначена производная в направлении x .

Учитывая, что в зоне закрепления кривизна балки равна нулю, а перерезывающая сила связана с моментом, как $\frac{dM}{dx} = Q$, дифференциальное уравнение для изгибающего момента имеет вид:

$$x < L - a: \frac{d^2 M}{dx^2} - \alpha^2 M = 0, \quad \alpha^2 = \frac{5GF}{6EI} \quad (7.2)$$

Граничные условия для уравнения (7.2) определяются (7.1) на правом конце и условием по отсутствию нагрузки на левом, то есть возможно использовать условия вида:

$$\begin{aligned} x = L - a: M &= Pa \\ x = 0: M &= 0 \end{aligned} \quad (7.3)$$

или

$$\begin{aligned} x = L - a: \frac{dM}{dx} &= Q = P \\ x = 0: M &= 0 \end{aligned} \quad (7.3)'$$

Удовлетворить оба условия по моменту и по перерезывающей силе в (7.1) не представляется возможным, так как в записанной модели для этого не хватает констант. Выполнение условия $M=0$ на удаленном конце закрепленной балки является обязательным, так как оно подразумевает отсутствие углов поворота сечений балки, что выполняется либо в случае симметрии рассматриваемой задачи, либо в случае достаточной протяженности зоны закрепления балки.

Общее решение задачи (7.2) имеет вид:

$$M(x) = C_1 e^{\alpha x} + C_2 e^{-\alpha x}$$

С учетом граничных условий (7.3) и упрощений получаем распределение момента в зоне закрепления:

$$M(x) = Pa \frac{sh(\alpha x)}{sh(\alpha(L-a))},$$

соответственно, перерезывающая сила и распределенная поперечная нагрузка:

$$Q(x) = \frac{dM(x)}{dx} = aP\alpha \frac{ch(\alpha x)}{sh(\alpha(L-a))}, \quad (7.4)$$

$$q(x) = \frac{d^2M}{dx^2} = aP\alpha^2 \frac{sh(\alpha x)}{sh(\alpha(L-a))}. \quad (7.5)$$

Заметим, что перерезывающая сила (7.4) определяет касательные напряжения, которые реализуются в балке и на границе ее контакта с подложкой. Характер распределения касательных напряжений по толщине балки вне зоны закрепления определяется параболической зависимостью, однако, в зоне контакта эта зависимость отклоняется от классического закона, в первую очередь, потому что на нижней поверхности балки касательные напряжения перестают быть равными нулю из-за ее сопряжения с подложкой. По аналогии с классическим подходом, предлагается ввести следующую оценку для определения искомых касательных напряжений на контакте балки с подложкой с использованием поправочного коэффициента:

$$\tau_{xz} = k_\tau \frac{Q}{bh} = k_\tau \frac{aP\alpha}{bh} \frac{ch(\alpha x)}{sh(\alpha(L-a))}. \quad (7.6)$$

Эти напряжения (7.6) приводят к срезу покрытия с подложки. Нормальные напряжения, которые приводят к отрыву покрытия, оцениваются на основе найденной распределенной нормальной нагрузки (7.5). Величина $q(x)$ является погонной нагрузкой, соответственно, нормальные напряжения определяются следующим соотношением, в котором мы также вводим поправочный коэффициент:

$$\sigma_z = k_\sigma \frac{q}{b} = k_\sigma \frac{aP\alpha^2}{bh} \frac{sh(\alpha x)}{sh(\alpha(L-a))}. \quad (7.7)$$

Коэффициенты k_τ, k_σ предлагается определить из сопоставления полученных решений с численным моделированием для рассматриваемой задачи (см. далее). Максимальные касательные и нормальные напряжения, которые могут быть использованы при обработке экспериментальных данных, реализуются на границе зоны закрепления и имеют вид (с учетом определения для α^2 в (7.2)):

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \tau_{xz}(L-a) = k_{\tau} \frac{aP}{bh} \sqrt{\frac{5GF}{6EI}} \operatorname{cth} \left((L-a) \sqrt{\frac{5GF}{6EI}} \right) = \\ &= k_{\tau} \frac{aP}{bh^2} \sqrt{\frac{5}{1+\nu}} \operatorname{cth} \left(\frac{L-a}{h} \sqrt{\frac{5}{1+\nu}} \right),\end{aligned}\quad (7.8)$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_z(L-a) = k_{\sigma} \frac{aP}{b} \frac{5GF}{6EI} = k_{\sigma} \frac{aP}{bh^2} \frac{5}{1+\nu}, \quad (7.9)$$

где ν – коэффициент Пуассона материала балки.

Из полученных решений (7.6) - (7.9) видно, что напряжения затухают по экспоненциальному закону при удалении от границы зоны закрепления (в соответствии с принципом Сен-Венана). Максимальные значения этих напряжений аналогичным образом зависят от параметров модели. Они пропорциональны приложенной нагрузке и длине свободного конца образца, выступающего за подложку, и обратно пропорциональны ширине образца и квадрату его толщины (см. (7.8), (7.9)). При достаточно большой протяженности зоны закрепления ($L \gg a$) касательные напряжения практически перестают зависеть от ее длины, так как перестает оказывать влияние свободный конец балки в точке $x = 0$:

$$\tau_{\max} \Big|_{L \rightarrow \infty} = k_{\tau} \frac{aP}{bh^2} \sqrt{\frac{5}{1+\nu}}. \quad (7.10)$$

В этом случае реализуется постоянное соотношение между касательными и нормальными напряжениями, которое определяется коэффициентом Пуассона материала балки:

$$\frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\max}} \Big|_{L \rightarrow \infty} = \frac{k_{\tau}}{k_{\sigma}} \sqrt{\frac{1+\nu}{5}}.$$

В случае небольшой длины зоны закрепления, влияние конца балки, на котором задана нулевая нагрузка ($x = 0$), все равно оказывается незначительным. На рисунке 7.2 показано, что при увеличении относительной длины подложки (в долях толщины образца), уровень максимальных касательных напряжений быстро снижается и выходит на асимптотическое значение. Изменение этого уровня

реализуется в пределах 5% от асимптотического значения при любом значении коэффициента Пуассона, характерном для конструкционных материалов.

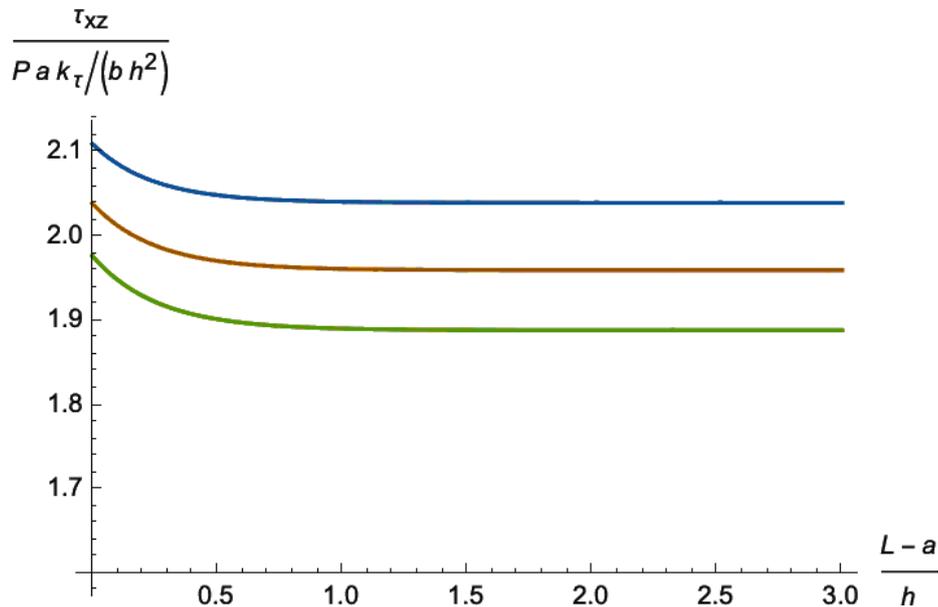


рисунок 7.2 – Зависимость максимальных касательных напряжений в точке отрыва от размеров зоны закрепления образца

Цвета: синий – $\nu = 0.2$, желтый – $\nu = 0.3$, зелёный $\nu = 0.4$.

В результате, для обработки экспериментальных данных можно использовать наиболее простые соотношения (7.9), (7.10), в которых остается только определить поправочные коэффициенты. Это было сделано с использованием сопоставления результатов расчетов с численным моделированием. Была рассмотрена двумерная модель в рамках гипотезы плоского напряженного состояния, представленная на рисунке 7.3. Модель состоит из стальной балки и стальной подложки, между которыми заданы условия идеального контакта по перемещениям и напряжениям. На свободном конце балки прикладывается нагрузка, действующая в вертикальном направлении и распределенная по торцу балки. Нижняя поверхность основания фиксируется, либо задаются условия симметрии на левой границе балки (это условие соответствует нагружению модели по схеме трехточечного изгиба, который легко реализовать в экспериментах на стандартном оборудовании).

В расчетах используются элементы квадратной формы второго порядка (с квадратичной аппроксимацией). Материал всей модели – сталь. Покрытие на балке и слой клеевого соединения в явном виде не прорисовываются, в предположении, что их толщина мала.

Рассматриваются модели с разной длиной и толщиной балок. По толщине балки всегда располагается 3 элемента. На границе зоны закрепления балки сделан небольшой «подкос» размером 0.5 мм, обеспечивающий независимость решения от размера сетки (в противном случае возникает прямой угол и концентрация напряжений). В расчетах была задана величина нагрузки 5 Н. Длина всей модели составляла 100 мм, ширина задавалась равной 10 мм.

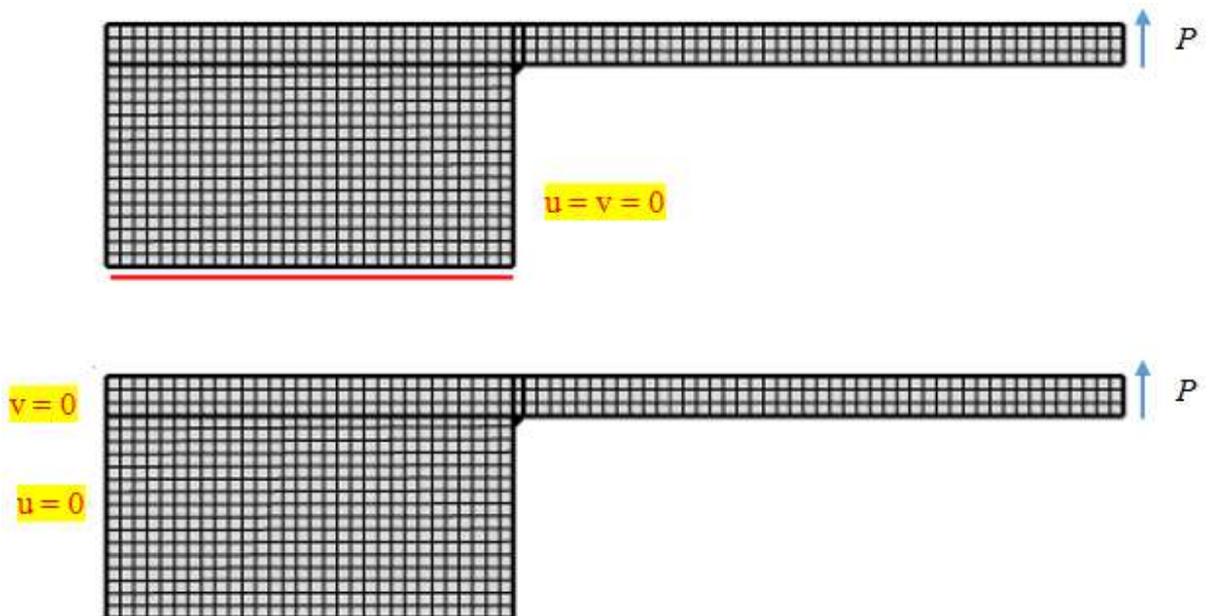
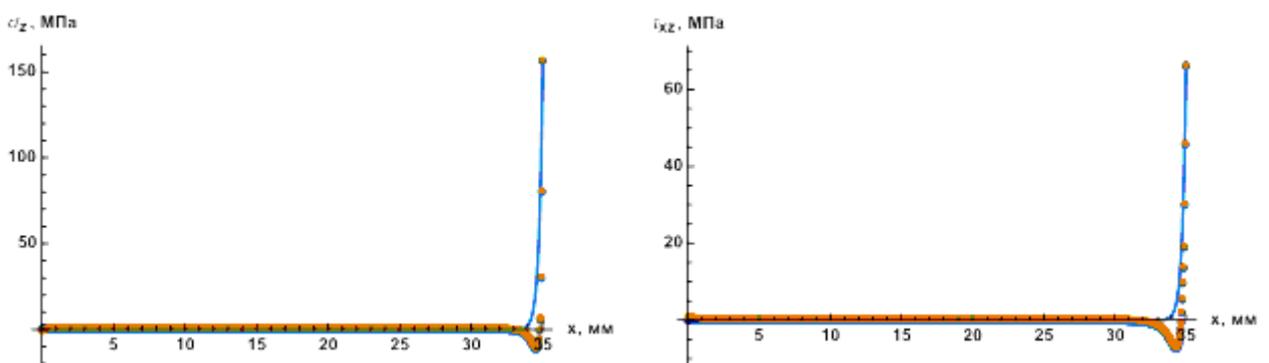


рисунок 7.3 – Конечно-элементная модель балки, закрепленной на подложке, нагружаемая по схеме консольного (вверху) и трехточечного (внизу) изгиба.

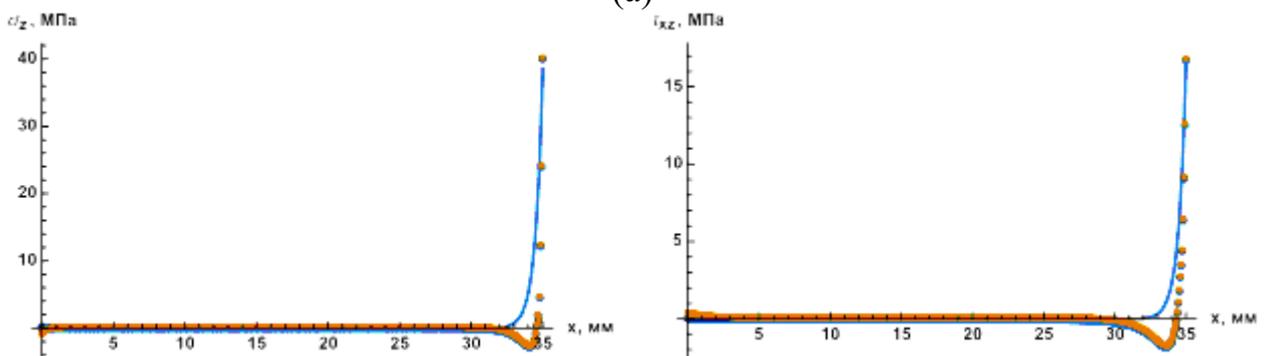
Результаты сопоставления полученных численных решений с аналитическими формулами (7.6) и (7.7) показаны на рисунках 7.4 и 7.5. Здесь показано распределение касательных и нормальных напряжений на границе контакта балки с подложкой внутри зоны закрепления балки. Точками показаны результаты численного моделирования, линиями – аналитически решения (7.6) и

(7.7). Для совпадения аналитических оценок с численными расчетами были подобраны поправочные коэффициенты, используемые в (7.6) и (7.7): $k_\tau = 8/7$, $k_\sigma = 4/3$.

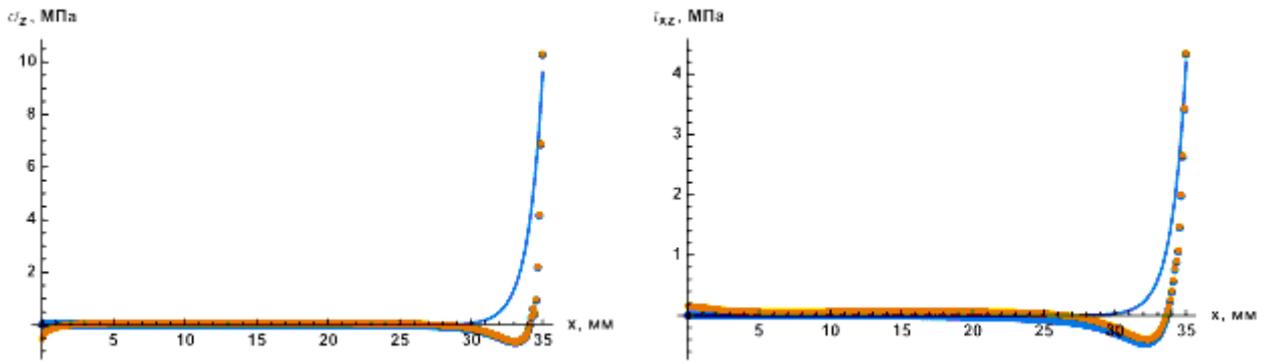
Как видно, из рисунков 7.4, 7.5, эти значения коэффициентов позволяют получить достаточно хорошую согласованность максимальных значений напряжений реализующихся в точке отрыва на границе зоны закрепления. Сама зависимость, в рамках двумерного моделирования оказывается более сложной, чем прогнозируем модель балок Тимошенко (заметим, что балочная модель непосредственно получает оценить перерезывающую силу и погонную нагрузку, а напряжения оцениваются пересчетом, однако, характер распределения этих величин связан друг с другом). Реализующееся изменение напряжений с изменением знака является характерным для задач с краевыми эффектами, в которых напряжения затухают по принципу Сен-Венана при удалении от зоны концентрации и изменяются по закону «экспонента, умноженная на косинус», то есть экспоненциально затухают с осцилляцией амплитудных значений напряжений вблизи нуля.



(a)

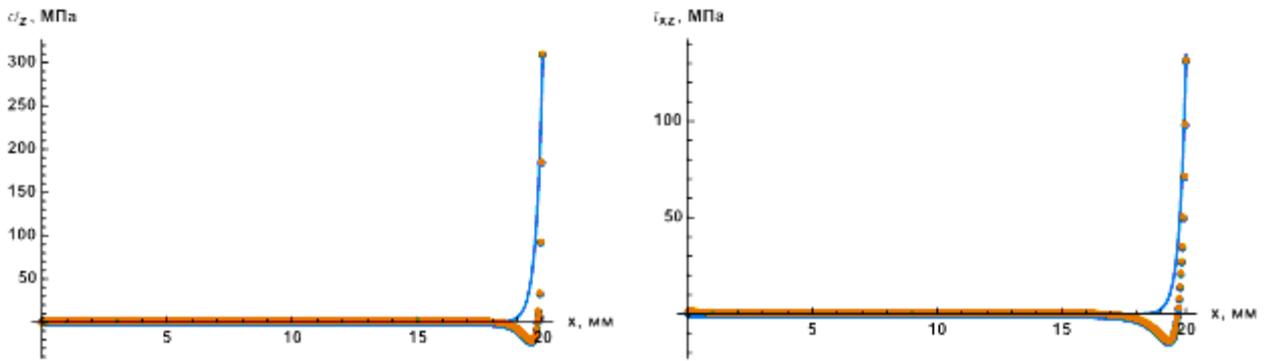


(б)

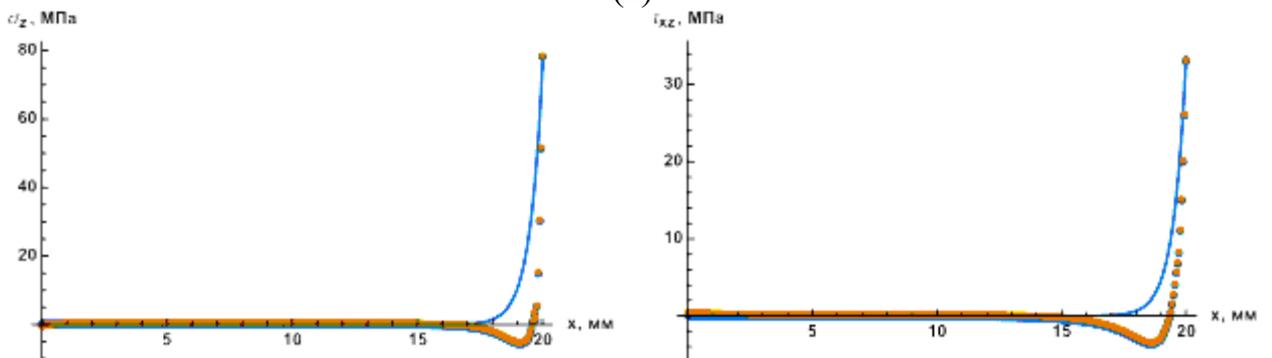


(В)

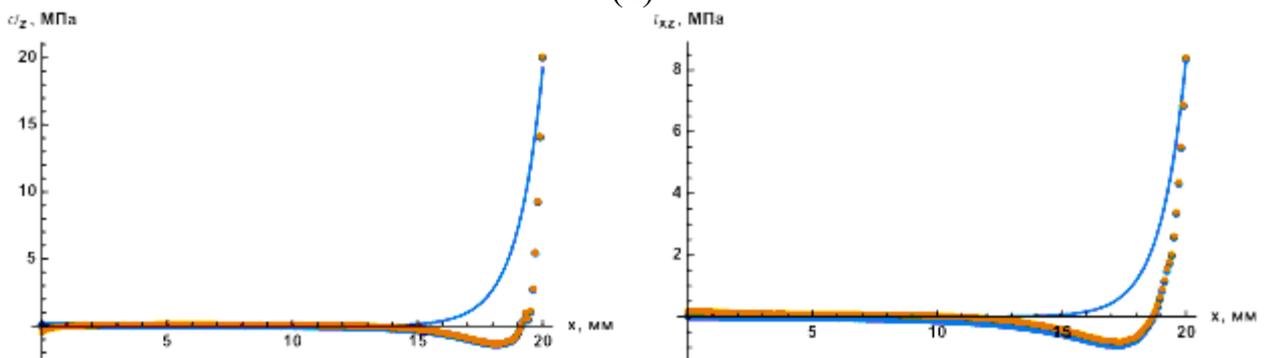
рисунок 7.4 – Распределение нормальных (слева) и касательных (справа) напряжений на границе закрепления балки с основанием, точки – численное решение (синий цвет – консольное нагружение, желтый – 3-точечный изгиб), линии – аналитическое решение, толщина балки а: 0.5 мм, б: 1 мм, в: 2 мм, длина свободного конца балки, через который передается нагрузка, 15 мм



(а)



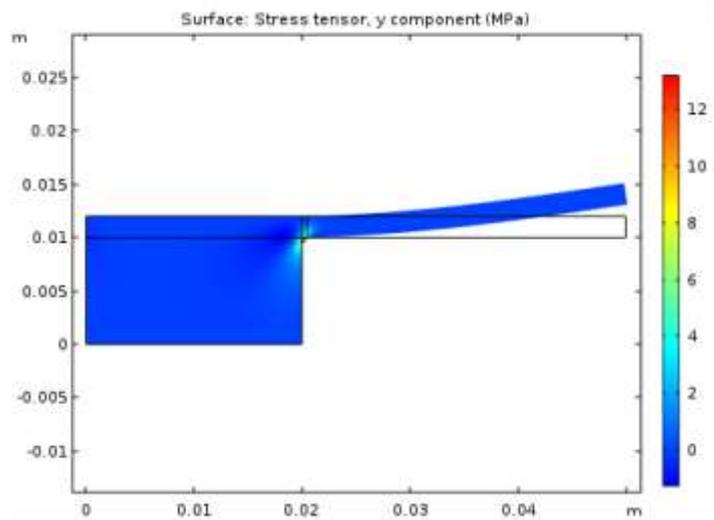
(б)



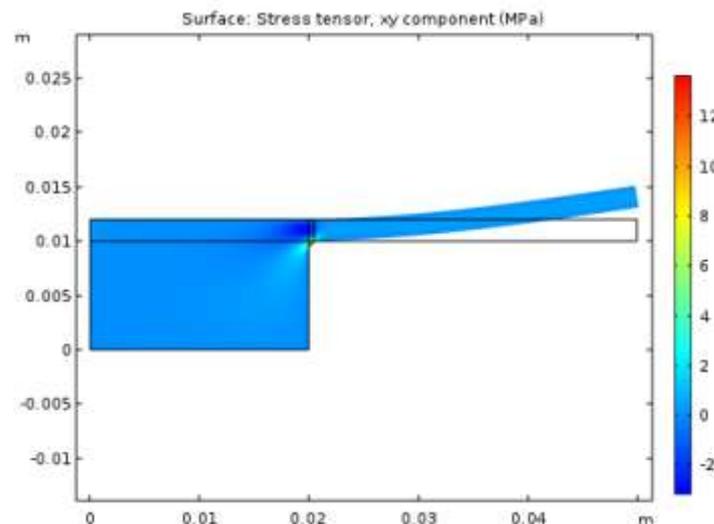
(в)

рисунок 7.5 – Распределение нормальных и касательных напряжений на границе закрепления балки с основанием, точки – численное решение (синий цвет – консольное нагружение, желтый – 3-точечный изгиб), линии – аналитическое решение, толщина балки а: 0.5 мм, б: 1 мм, в: 2 мм. Длина свободного конца балки, через который передается нагрузка, 30 мм

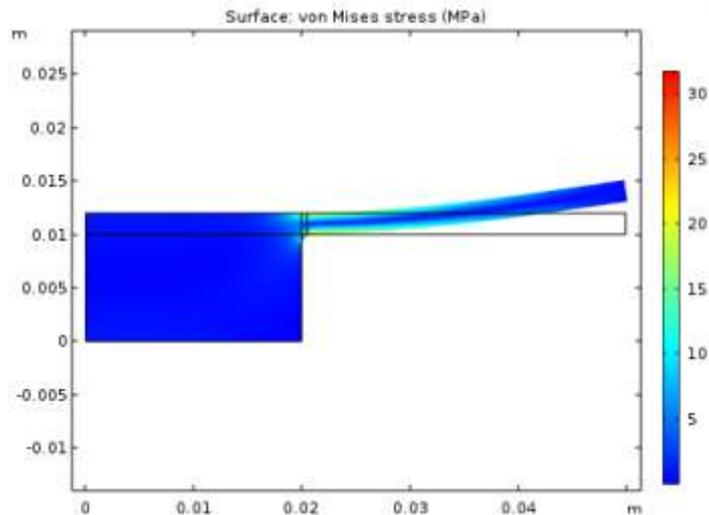
Типичные результаты численных расчетов для плоской модели показаны на рисунке 7.6



(a)



(б)



(в)

рисунок 7.6 – Результаты численных расчетов. Цветом показано распределение нормальных напряжений (а), касательных (б) и интенсивности напряжений по Мизесу (в).

Уточнить полученный результат для закона изменения напряжений внутри зоны закрепления возможно с использованием моделей балок, учитывающих обжатие. В этом случае удастся приблизиться к описанию осциллирующего характера затухания напряжений (эта возможность уточнения модели Тимошенко обсуждалась, например, в монографии [78]). Однако, это уточнение в рассматриваемом случае не является принципиальным, так как с точки зрения приложений, важно знать только максимальные напряжения, реализующиеся в точке отрыва покрытия. Поэтому полученные решения, в целом, можно считать прикладными, и применять их на практике.

Недостатком предложенной в данном разделе схемы испытаний является то, что, фактически, при любых размерах образца, мы будем получать одинаковое соотношение между касательными и нормальными напряжениями в зоне отрыва покрытия, то есть, с точки зрения формулировки критерия прочности для покрытия, мы будем иметь всегда одну точку:

$$\frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\max}} = \frac{k_{\tau}}{k_{\sigma}} \sqrt{\frac{1+\nu}{5}} \approx 0.42 \dots 0.45, \nu = 0.2 \dots 0.4.$$

Помимо этой точки, мы еще можем использовать данные стандартных экспериментов, в которых реализуется чистый отрыв $\tau_{\max} = 0$ или срез покрытия $\sigma_{\max} = 0$. Итого, три точки (в системе координат касательные /нормальные напряжения), чего может быть недостаточно для проверки критерия прочности. В следующем разделе будет показано, что проведение испытаний с податливой подложкой на трехточечный изгиб позволяет получить различное соотношение между уровнем напряжений в зоне отрыва и, таким образом, получить дополнительные данные по характеру нарушения прочности покрытия в условиях действия различного сочетания нагрузок.

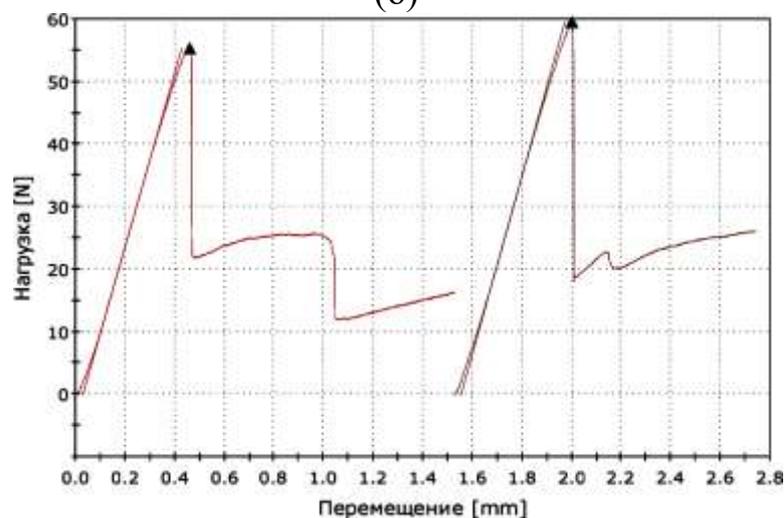
Пример испытаний представлен на рисунке 7.7. Здесь показано испытание по схеме трехточечного изгиба образца, к которому с нижней стороны приклеена проставка достаточно большой толщины. Образец выполнен из стали, материал проставки – АБС пластик, полученный трехмерной печатью. В реализованном испытании область, приклеенная к подложке, практически, не изгибается и реализуется отрыв консольного конца образца в зоне, где подложка заканчивается. При верном выборе клея отслоение происходит по границе подложка/покрытие (а не по границе покрытие/клей или клей/проставка). Таким образом, реализована схема испытаний, соответствующая построенному решению. В результате испытаний было установлено, что нагрузка, при которой происходит отслоение для образца толщиной 1 мм с толщиной проставки 5 см, составляет 57 (+2) Н. Соответственно, уровень напряжений, действующих в покрытии при отслоении, определяется формулами (7.9) и (7.10) и составляет $\sigma_{\max} = 18.2$ МПа, $\tau_{\max} = 7.8$ МПа.



(a)



(б)



(в)

рисунк 7.7 – Испытание на отрыв образца с покрытием и дополнительной поддержкой, исключающей изгиб в центральной части образца:

(а) – процесс испытаний;

(б) – характер отслоения покрытия;

(в) – характерные диаграммы нагрузка/перемещения, получаемые в испытаниях.

7.2 Численное моделирование испытаний на трехточечный изгиб образцов с покрытием в условиях стесненных сдвиговых деформаций

Для создания сложного напряженного состояния на контакте покрытия с подложкой предлагается схема испытаний, представленная на рисунке 7.8. К стальному образцу с покрытием снизу приклеивается дополнительный слой («проставка»), обеспечивающая концентрацию напряжений. Дополнительный

слой может выполняться из полимерного материала (в частности, в испытаниях этот слой изготавливался трехмерной печатью из ABS пластика) и иметь длину меньшую, чем расстояние между опорами в испытаниях на трехточечный изгиб. В зоне, где слой закачивается и в рабочем сечении остается только сам образец, реализуются максимальные касательные напряжения и напряжения в направлении толщины образца, приводящие к отрыву покрытия от подложки, при условии, что прочность клеевого соединения выше, чем прочность контакта покрытия с подложкой, что обеспечивается выбором клея. Как будет показано в данной главе, выбором размеров дополнительного слоя, возможно контролировать соотношение уровня касательных и нормальных напряжений в зоне отрыва и, таким образом, исследовать прочность покрытия в различных условиях нагружения. что принципиально было невозможно сделать в рамках схемы испытаний, рассмотренной в предыдущем подразделе.

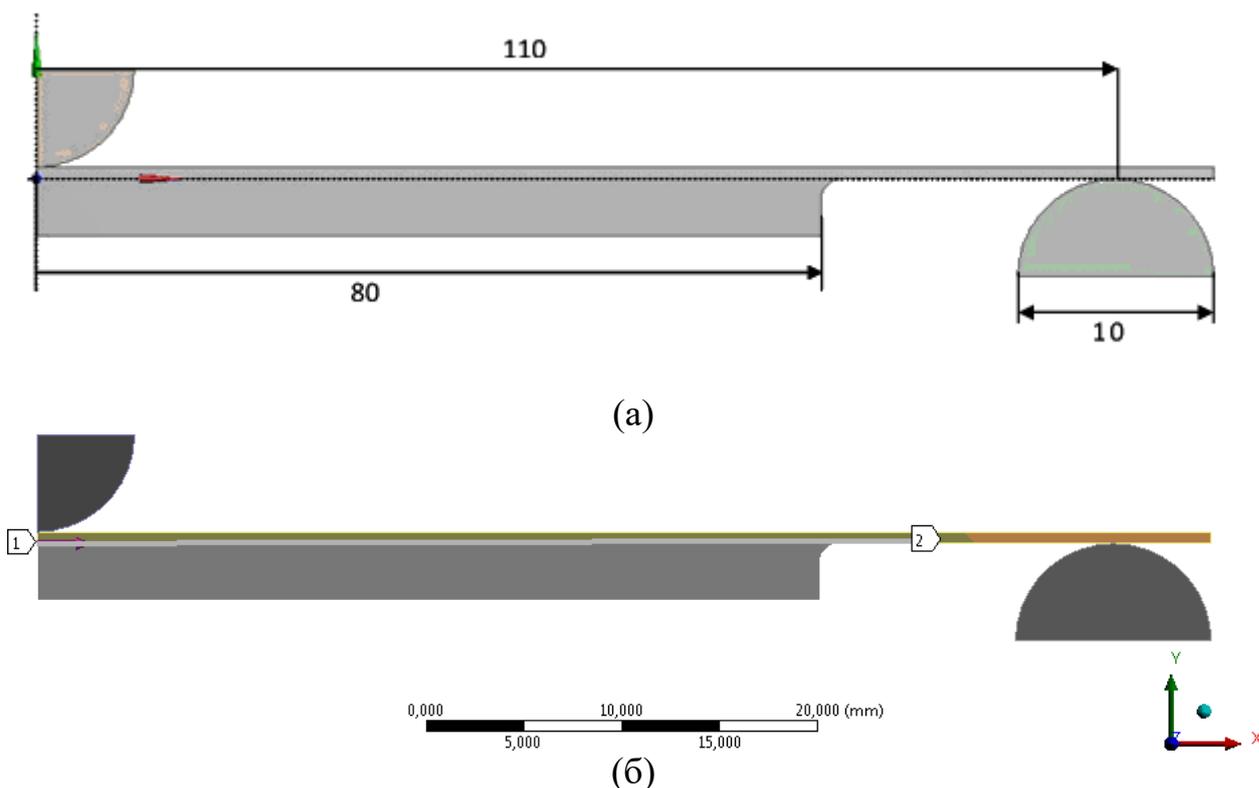


рисунок 7.8 – Характерные размеры образца 1.1

(а – геометрические параметры образцов и расстояние между опорами,
б – участок, где определяются напряжения)

Для разработки схемы эксперимента, было произведено моделирование в ПО Ansys Workbench испытания на 3х точечный изгиб, с расстоянием между опорами 110мм, 3х типов образцов из стали 08ПС длиной 120 мм и шириной 12 мм с тремя разными толщинами равными 1,6 мм для партии 1, 0,75 мм для партии 2 и 0,5 мм для партии 3. С противоположной стороны от приложения нагрузочной площадки приклеена проставка толщиной 4 мм и шириной равной ширине образца, 12 мм. При этом для каждой партии приклеивается три варианта проставки различной длины: 60 мм с маркировкой 3, 70 мм с маркировкой 2 и 80 мм с маркировкой 1. Опоры и давящая площадка представляют собой полусфера диаметром 10мм. Пример образца 1.1 с характерными размерами представлен на рисунке 7.7а. На опорах ставятся условия заделки, а нагрузка при 3х точечном изгибе равна 1482Н. Между образцом и опорой устанавливается условие контакта без разделения (no separation-жесткое соединение элементов между собой, но с возможностью проскальзывания в зоне контакта от сдвигающих усилий.), между

образцом и проставки ставится условие жёсткого клееного соединения (Bonded - идеальное соединение элементов между собой), а между образцом и давящей площадкой ставится условие контакта с коэффициентом трения металл по металлу равный 0,2 (Frictional - нелинейный контакт, который позволяет реальные неидеализированные условия контакта). Так как задача имеет плоскость симметрии, то производится расчет только половины образца, а на оси симметрии ставится условия по запрещению смещений в направлении нормали к плоскости симметрии.

Дополнительного сглаживания (скругления) в зоне окончания проставки в данных расчетах не задавалось, так как стояла задача определения возможности получения различного сочетания касательных и нормальных напряжений в зоне отрыва покрытия, что можно качественно оценить и в рамках рассматриваемой негладкой геометрии модели.

Конечно-элементная модель (КЭМ) для партии 1 с различными проставками представлена на рисунке 7.8. Модель партии с проставкой 80 мм 1 состоит из 7976 элементов и 24787 узлов, на рисунке 7.8а. Модель партии с проставкой 70 мм 2 состоит из 16775 элементов и 51688 узлов, на рисунке 7.8б. Модель партии с проставкой 60 мм 3 состоит из 25193 элементов и 77270 узлов, на рисунке 7.8в. Распределение напряжений рассматривают на участке изображенном на рисунке 7.8б. Нормальные напряжения σ_y и касательных напряжений τ_{xy} для образцов партии 1 представлено на рисунке 7.9 для образца с проставкой 80мм, на рисунке 7.10 – для образца с проставкой 70мм и на рисунке 7.11 – для образца с проставкой 60мм. Нормальные напряжения σ_y и касательных напряжений τ_{xy} для образцов партии 2 представлено на рисунке 7.12 для образца с проставкой 80мм, на рисунке 7.13 – для образца с проставкой 70мм и на рисунке 7.14 – для образца с проставкой 60мм. Нормальные напряжения σ_y и касательных напряжений τ_{xy} для образцов партии 3 представлено на рисунке 7.15 для образца с проставкой 80мм, на рисунке 7.16 – для образца с проставкой 70мм и на рисунке 7.17 – для образца с проставкой 60мм. Зависимости нормальных и касательных напряжений для каждой партии даны на рисунке 7.18 и в таблице 7.1.

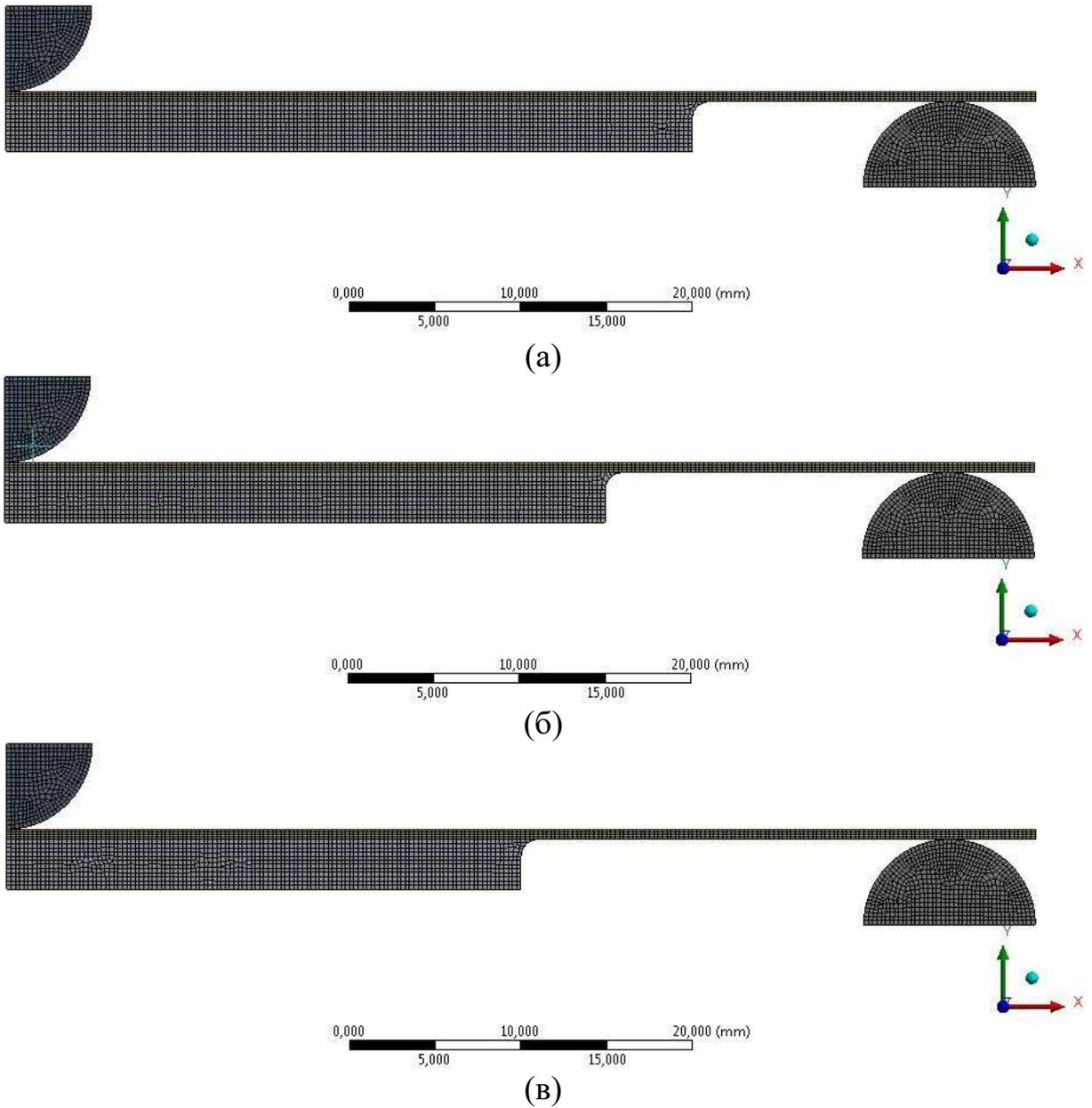
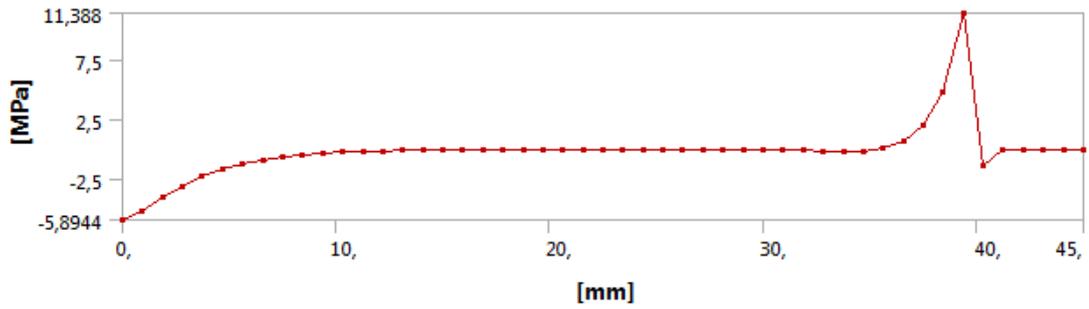


рисунок 7.8 – КЭМ образцов на 3-точечный изгиб с различными проставками:

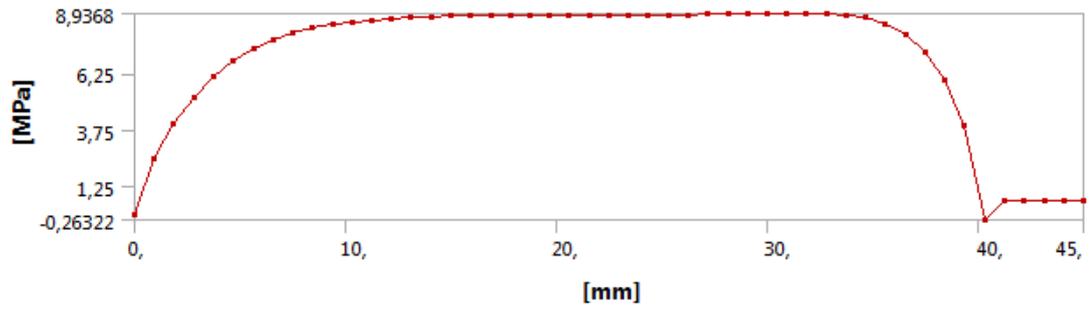
(а) – проставка длиной 80 мм;

(б) – проставка длиной 70 мм;

(в) – проставка длиной 60 мм

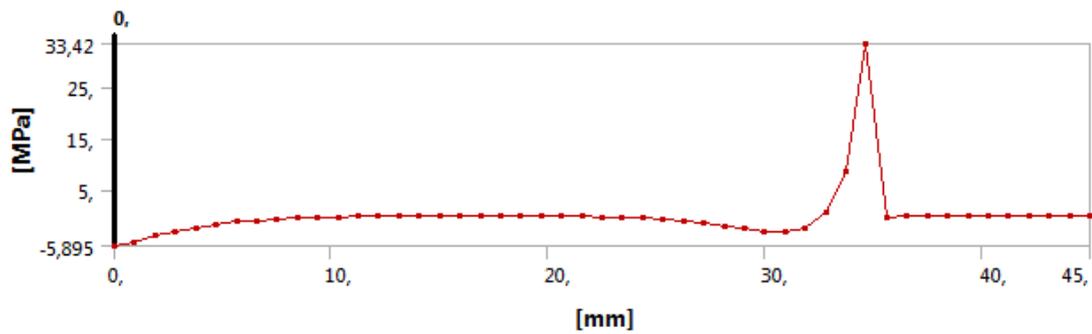


(a)

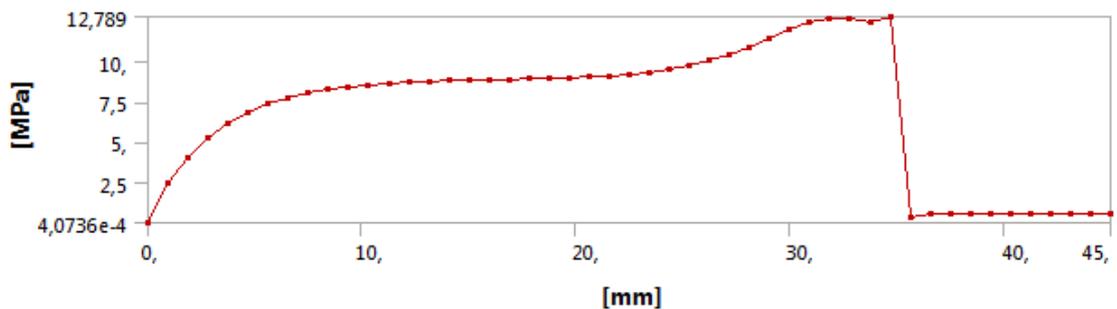


(б)

рисунок 7.9 – Нормальные σ_y – (а) и касательные τ_{xy} – (б) напряжения для партии 1 с подложкой 80 мм.

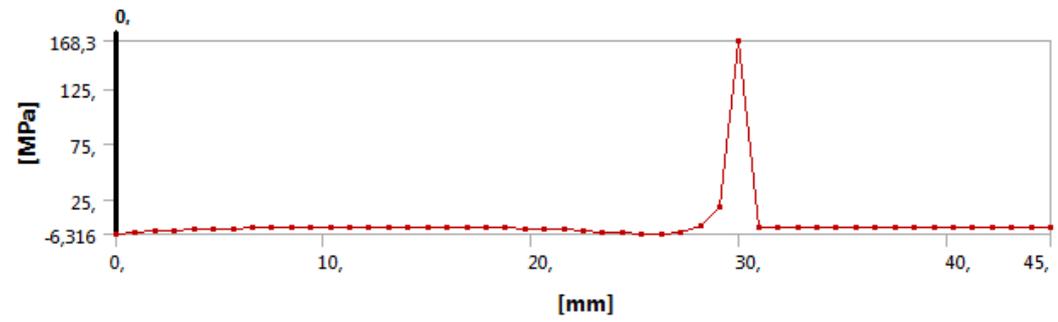


(a)

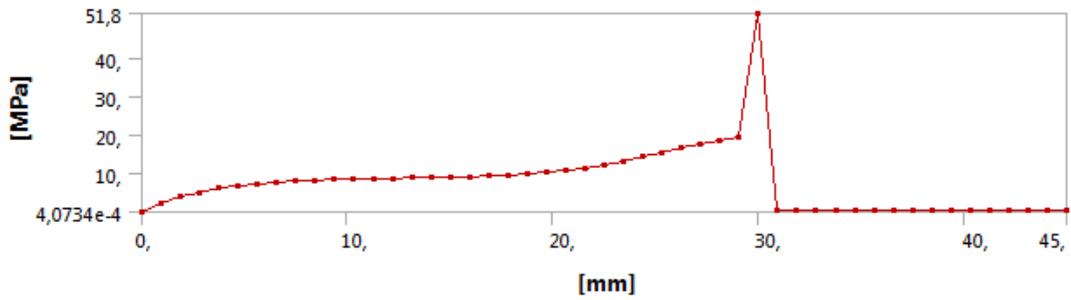


(б)

рисунок 7.10 – Нормальные σ_y – (а) и касательные τ_{xy} – (б) напряжения для партии 1 с подложкой 70 мм.

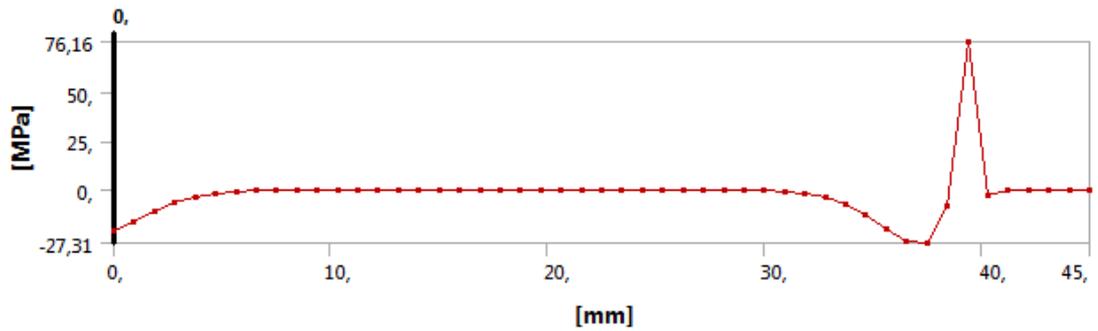


(a)

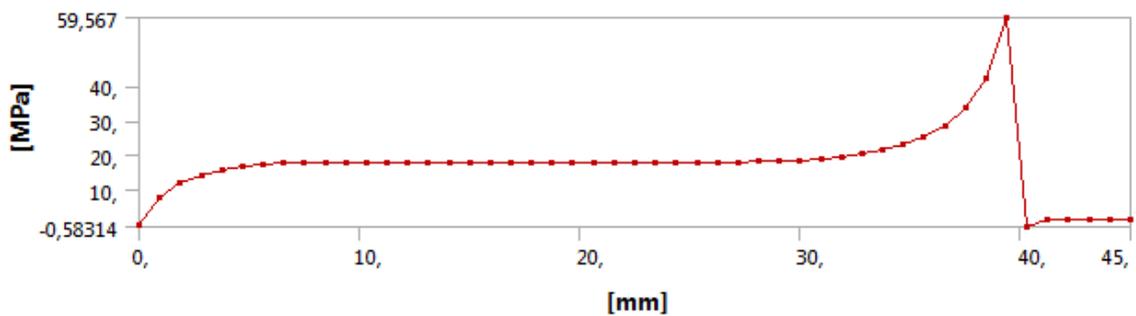


(б)

рисунок 7.11 – Нормальные σ_y – (а) и касательные τ_{xy} – (б) напряжения для партии 1 с подложкой 60 мм.



(a)



(б)

рисунок 7.12 – Нормальные σ_y – (а) и касательные τ_{xy} – (б) напряжения для партии 2 с подложкой 80 мм.

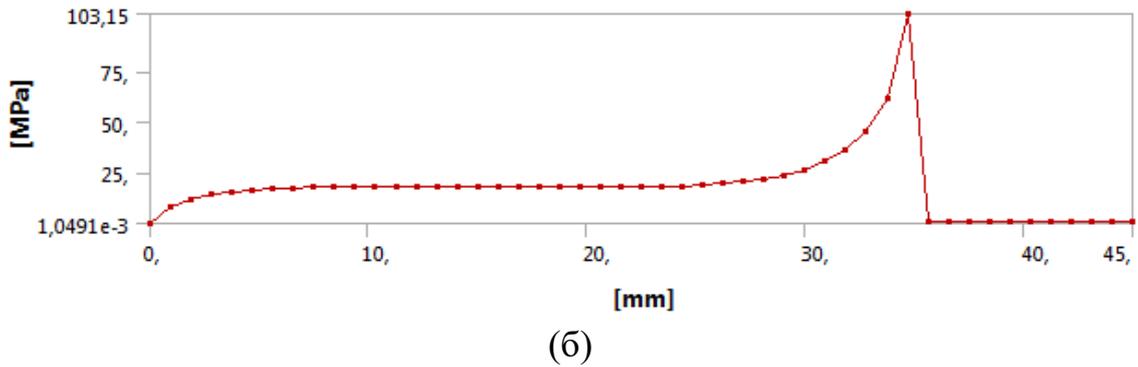
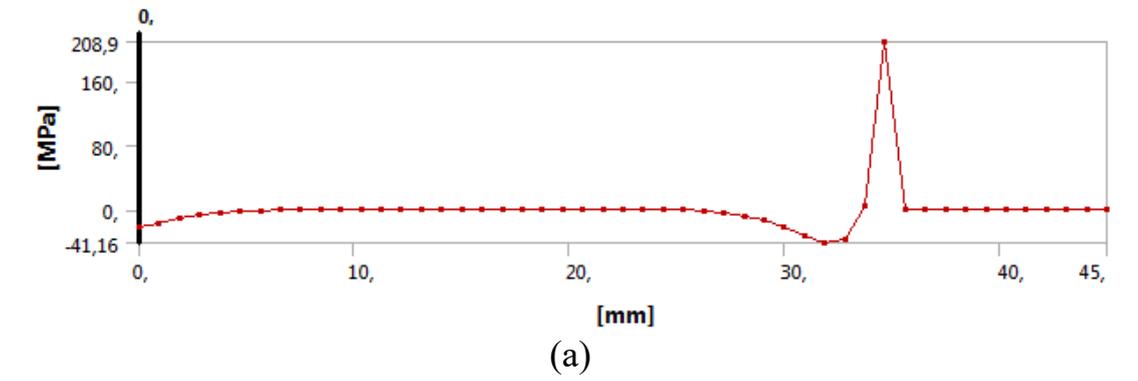


рисунок 7.13 – Нормальные σ_y – (а) и касательные τ_{xy} – (б) напряжения для партии 2 с подложкой 70 мм.

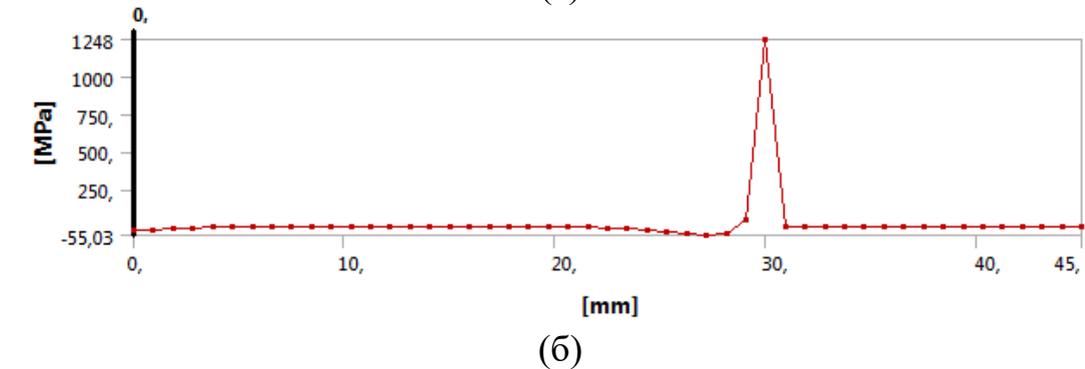
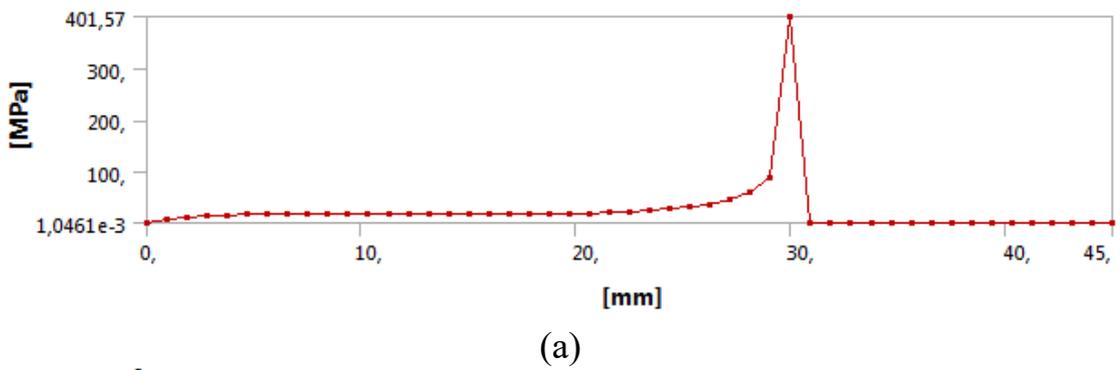
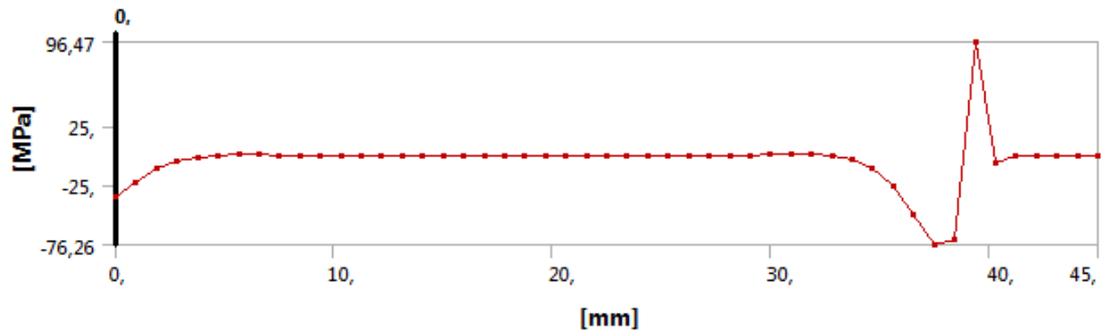
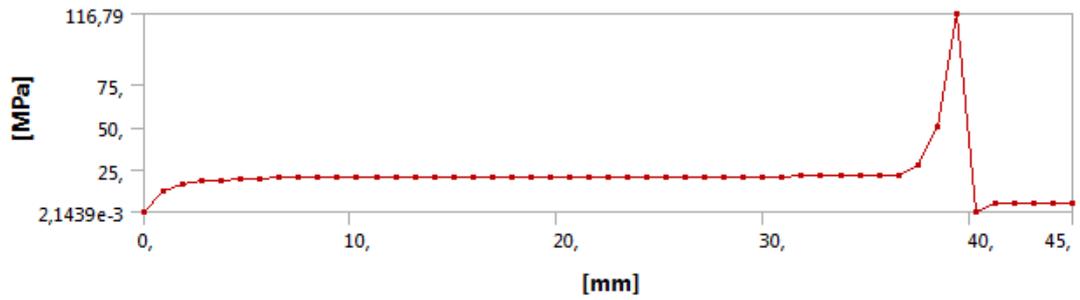


рисунок 7.14 – Нормальные σ_y – (а) и касательные τ_{xy} – (б) напряжения для партии 2 с подложкой 60 мм

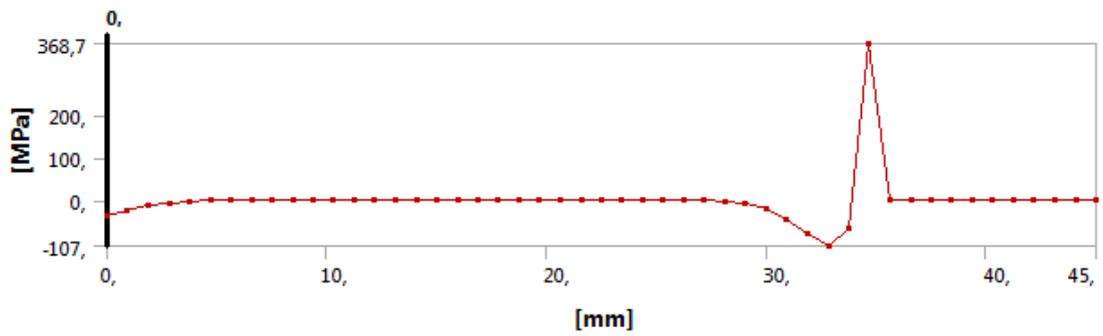


(a)

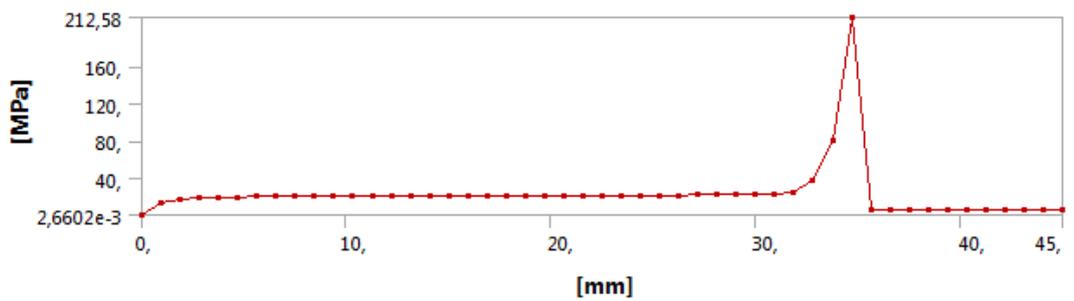


(б)

рисунок 7.15 – Нормальные σ_y – (а) и касательные τ_{xy} – (б) напряжения для партии 3 с подложкой 80 мм

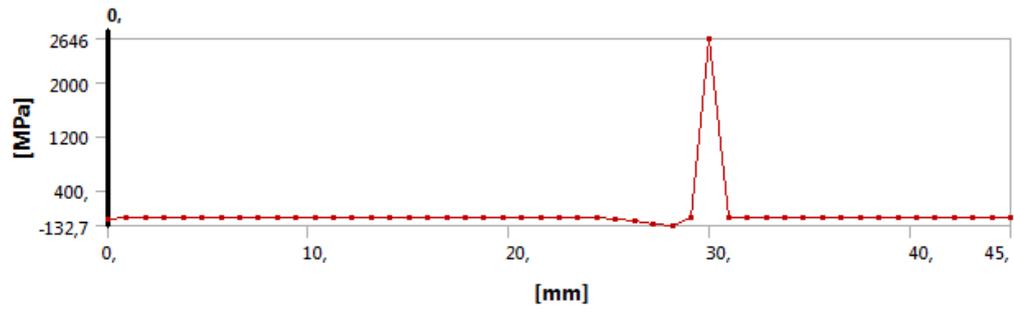


(a)

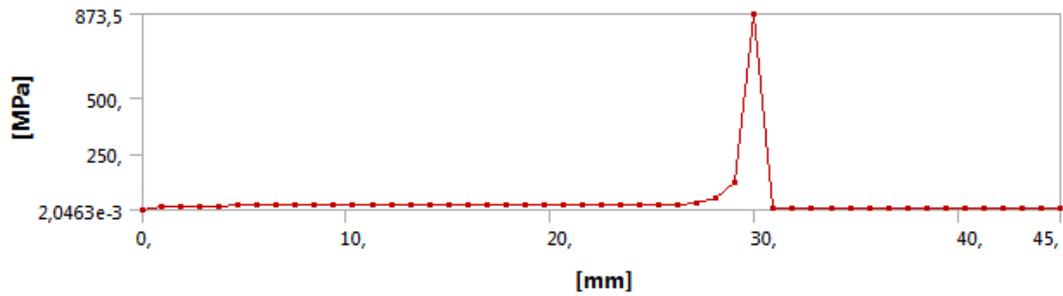


(б)

рисунок 7.16 – Нормальные σ_y – (а) и касательные τ_{xy} – (б) напряжения для партии 3 с подложкой 70 мм



(a)



(б)

рисунок 7.17 – Нормальные σ_y – (а) и касательные τ_{xy} – (б) напряжения для партии 3 с подложкой 60 мм

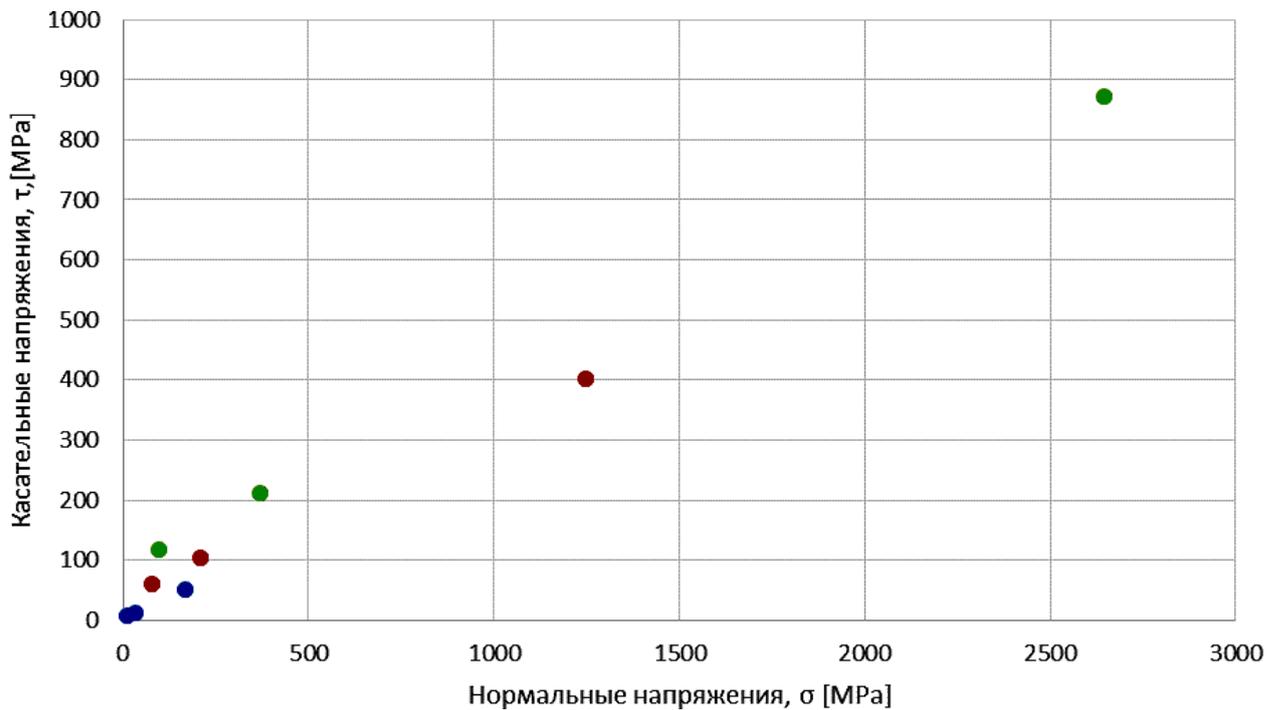


рисунок 7.18 – Зависимость нормальных и касательные напряжения для каждой партии. (1 партия – синие точки, 2 партия – красные точки, 3 партия – зеленые точки)

Таблица 7.1 – Результаты испытаний.

	Толщина, мм	Длина, мм	σ , МПа	τ , МПа
1-1	1,6	80	11,38	8,93
1-2	1,6	70	33,42	12,79
1-3	1,6	60	168,3	51,8
2-1	0,75	80	76,16	59,67
2-2	0,75	70	208,9	103,15
2-3	0,75	60	1248	401,57
3-1	0,5	80	96,47	116,79
3-2	0,5	70	368,75	212,58
3-3	0,5	60	2646	873

Из таблицы 7.1 и рисунка 7.18 видно, что выбором геометрии дополнительного слоя, приклеиваемого к образцу, можно управлять соотношением между уровнями касательных и нормальных напряжений, что и является нашей задачей.

Пример испытаний образца с дополнительным, наклеенным слоем, представлен на рисунке 7.19, где показано, что отслоение в выбранных испытаниях происходит именно на контакте покрытие-подложка (сталь), что и требуется для оценки их контактной прочности. Результаты испытания для образцов с различной толщиной стальной подложки приведены в таблице 7.2. Было испытано по два образца толщиной 0.6, 0.8, 1 мм. Обработка результатов испытаний для определения действующих в покрытии напряжений проводилась с использованием конечно-элементной модели с заданной скругленной областью контакта дополнительного наклеенного слоя и образца для исключения возникновения концентрации напряжений. В расчетах задавались максимальные перемещения, реализуемые в образце в момент отслоения. Рассчитывались значения напряжений на контакте образца с подставкой, и рассчитывалась интенсивность напряжений по Мизесу и максимальные касательные напряжения.



(a)



(б)



(в)

рисунок 7.19 – (а) – Процесс испытаний образца с дополнительным приклеенным слоем; образец до – (б) и после –(в) испытаний

Таблица. 7.2 – Результаты испытаний покрытий на отслоение при трехточечном изгибе

Толщина стали	0,6 мм		0,8 мм		1 мм	
	Подложка 4 мм		Подложка 4 мм		Подложка 4 мм	
Максимальная нагрузка, <i>H</i>	38,986	22,537	47,803	53,901	40,417	55,635
Максимальные перемещения, мм	2,174	2,121	2,946	2,465	1,953	1,765
t_{uXY} , МПа	2,551	2,4894	3,533	2,9188	2,2697	2,0538
S_Y , МПа	7,7457	7,5397	9,4343	7,791	5,5324	4,9634
Интенсивность напряжений по Мизесу в момент отслоения, МПа	8,68	8,69	11,21	9,21	6,78	6,1
Максимальные касательные напряжения, МПа	4,6	4,5	5,9	4,8	3,8	3,2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлены результаты исследования механических свойств защитных порошковых покрытий на эпоксидно-полиэфирной основе, нанесенных на металлические подложки. Исследованы как свойства самих покрытий, так и их влияние на поведение образцов при механическом нагружении. Показано, что модуль упругости тонких покрытий оказывается выше, по сравнению с модулем упругости аналогичных объемных материалов. Этот результат получен, во-первых, по результатам испытаний образцов с покрытиями методами наноиндентирования с последующей обработкой экспериментальных данных с использованием стандартных аналитических упрощенных моделей, так и с использованием численного конечно-элементного моделирования. Во-вторых, проведены механические испытания образцов с покрытиями, нанесенными с одной или с двух сторон образца, которые также подтверждают значения модуля упругости исследуемых покрытий на уровне до 10 ГПа (при обычном значении для объемных материалов до 3.5 ГПа).

Для обработки результатов испытаний образцов с покрытиями проведены численные и аналитические расчеты. Дана оценка влияния остаточных напряжений на результаты идентификации модуля Юнга покрытий. В расчетах использованы оценки для значений остаточных напряжений, как по классическим соотношения (Стоуни, Болля), так и по уточненным формулам, учитывающим деформации в плоскости образца и его деформирование, как пластины малой толщины.

Проведено исследование влияния покрытий на механическое поведение образцов в условиях испытания на растяжение и устойчивость при комнатной и повышенной температуре. В испытаниях на растяжение показано, что наличие покрытий приводит к изменению характера разрушения образцов. В испытаниях на устойчивость проведено сопоставление результатов экспериментальных данных и результатов аналитических и численных расчетов, которые показали влияние наличия покрытий на устойчивость тонкостенных образцов. В процессе

проведения испытаний при повышенной температуре установлена важность обеспечения плотного закрепления (зажима) образцов, в отсутствие которого, происходит значительное увеличение погрешности проводимых измерений – вследствие температурных деформаций жесткость закрепления образцов снижается и, соответственно, отклоняются от условий жесткой заделки, принимаемой в расчетах.

Предложена методика оценки прочности контакта покрытий с подложкой в условиях действия нормальных и касательных напряжений в испытаниях на изгиб. В результате проведенных экспериментов и моделирования получены оценки прочности рассматриваемых покрытий.

В целом, полученные результаты направлены на развитие представлений о механических свойствах, а также о способах измерения и расчета механических свойств, тонких защитных покрытий, применяемых в различных отраслях промышленности и, в частности, широкого класса покрытий, применяемых для защиты от коррозии элементов конструкций авиационной техники. Полученные результаты могут быть использованы для оценки долговечности защитных покрытий, для оценки оптимальности выбранных технологических режимов их изготовления, прогнозом возникновения технологических дефектов и дефектов, возникающих в процессе эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гаврилов Д.Г., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Наноструктурированные лакокрасочные покрытия: экспериментальные исследования // Материалы I Всероссийской научно-технической школы – семинара “Компьютерный инжиниринг в промышленности и вузах”. М., МАИ, 2009. Стр. 24-25.
2. Гаврилов Д.Г., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Порошковые краски: свойства, особенности технологии, преимущества и перспективы // Материалы II Всероссийской научно-практической школы-семинара “Компьютерный инжиниринг в промышленности и вузах”. М., МАИ, 2009. Стр. 58-60.
3. Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Экспериментально-расчетный метод исследования физико-механических характеристик многослойных полимерных покрытий // Журнал “Нелинейный мир”. Том 10, №3, 2012. Стр. 156-161.
4. Гаврилов Д.Г., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Оценка механических характеристик порошковых лакокрасочных покрытий на эпоксидно-полиэфирной основе // Сборник трудов VI-ой конференции “Прочность неоднородных структур”. Москва, 17-19 апреля 2012г. М., МИСиС, 2012. Стр. 84.
5. Lopez I., Leung P. S., Inam F., Till C., Paulsen A. Mechanical characterization of protective coatings for offshore wind turbine towers and transition pieces // International Conference for Students on Applied Engineering, ICSAE 2016. 2017. Pp. 303–307.
6. Tillmann W., Nebel J. Analysis of the mechanical properties of an arc sprayed WC-FeCSiMn coating: Compression, bending, and tension behavior // Journal of Thermal Spray Technology. 2011. Vol. 20, №1–2, pp.317–327.
7. Sankar Kumar A., Mohanam K., Venkatachalam G., Karthikeyan S., Narayanan S. Influence of Nickel coating on flexural and dynamic behaviour of Aluminium // Procedia Engineering. 2014. Vol.97, №416, pp.1368–1378.

8. Гаврилов Д.Г., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Сравнительная характеристика прочностных свойств образцов с различными типами покрытий для изделий авиационной техники // Электронный журнал “Труды МАИ”, выпуск №40. М., МАИ, 2010. Стр. 1-14.
9. Зезин Ю.П., Ломакин Е.В., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н., Чистяков П.В. Определение модуля упругости покрытий по результатам испытаний на растяжение и изгиб трехслойных образцов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Том 78, №8, 2012. Стр. 61-63.
10. Зезин Ю.П., Ломакин Е.В., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н., Чистяков П.В. Определение упругих характеристик полимерных покрытий по результатам испытаний на растяжение и изгиб плоских образцов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия “Математика. Механика. Информатика”. Том 12, выпуск 3, 2012. Стр. 74-80.
11. Гаврилов Д.Г., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Наноиндентирование порошковых лакокрасочных покрытий на полиэфирной и эпоксидно-полиэфирной основе // Материалы Всероссийской научно-технической конференции “Новые материалы и технологии”. Москва, 20-22 ноября 2012г. М., МАТИ, 2012. Стр. 112-113.
12. Гаврилов Д.Г., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Влияние защитных покрытий на механические свойства тонкостенных конструкций // Материалы II Всероссийской студенческой научно-технической школы-семинара “Аэрокосмическая декада”. Алушта, 1-7 октября 2009г. М., МАИ, 2009. Стр. 14.
13. Гаврилов Д.Г., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Экспериментальное определение механических характеристик наноструктурированных лакокрасочных покрытий // Тезисы докладов 9-ой Международной конференции “Авиация и космонавтика”. Москва, 16-18 ноября 2010г. М., МАИ, 2010. Стр. 68-69.
14. Гаврилов Д.Г., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Наноиндентирование защитных лакокрасочных покрытий порошкового типа //

- Материалы XIX Международного симпозиума “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” им. А.Г.Горшкова. Том 1. Ярополец, 18-22 февраля 2013г. М., МАИ, 2013. Стр. 59-60.
15. 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. М., МАИ, 2014. Стр. 1-11.
16. Гетманов А.Г., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Лабораторные испытания порошковых лакокрасочных покрытий // Тезисы докладов Международного научного семинара “Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы”. Москва, 8-10 декабря 2014г. М., МАИ, 2014. С.15-16.
17. Белый В.А., Егоренков Н. И., Корецкая Л. С., Красовский А. М. Металлополимерные материалы и изделия. М.: Химия, 1979. 312 стр.
18. Бодо Мюлле, Ульрих Пот. Лакокрасочные материалы и покрытия. Принципы составления рецептур. М.: Пэйнт-Медиа, 2007. 237 стр.
19. Ирген Л.А., Керг Г.М., Кузнецов Г.К., Кненкас О.П. Структура и свойства поверхностных слоев полимеров. Киев. 1972. Стр. 198.
20. Кантенова Т.И., Касимова Г.С., Сухерева Т.М. и др. Методы и технология нанесения порошковых полимерных покрытий. М.:НИИТЭхим. 1990. 38 стр.
21. Верещагин И.П. Технология и оборудование для нанесения полимерных покрытий в электростатическом поле. М.: Энергоиздат. 1990. 240 стр.
22. Sankar Kumar A., Mohanam K., Venkatachalam, G., Karthikeyan, S., Narayanan, S. Influence of Nickel coating on flexural and dynamic behaviour of Aluminium // Procedia Engineering. 2014. Vol. 97, №416, pp. 1368–1378.
23. Порошковые краски. Технология покрытий. Под. ред. Яковлева А.Д., СПб., Химиздат, 2001. 256 стр.
24. Кантенова Т.И., Касимова Г.С., Сухерева Т.М. и др. Методы и технология нанесения порошковых полимерных покрытий. М.:НИИТЭхим, 1990. 38 стр.

25. Мачевская Р.А., Мочалова О.С. Подготовка поверхности под окраску. М.: Химия, 1971. 120 стр.
26. История авиационного материаловедения. ВИАМ 75 лет поиска, творчества, открытий / Под общ. ред. акад. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2007. 344 стр.
27. Рейбман А.И. Защитные лакокрасочные покрытия. Ленинград: Химия, 1982. 320 стр.
28. Яковлев А.Д., Здор В.Ф., Каплан В.И. Порошковые полимерные материалы и покрытия на их основе. Л. Химия, 1979.
29. Топуридзе Н.С. Автореф. канд. дис. М., НИФХИ им. Л.Я. Карпова, 1973.
30. Ушаков О.Б. Автореф. канд. дис. М., МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 1973.
31. Евтюков Н.З. Автореф. канд. дис. Л., ЛТИ им. Ленсовета, 1974.
32. Фарбер А.М. Автореф. канд. дис. Рига, ИМП АН Латв. ССР, 1974.
33. Пискарев В.В., Викторова Е.А., Вильданова А.И. Полимерно-порошковая краска, ее особенности и использование в объектах дизайна // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, №7, стр. 221-223.
34. Яковлев А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий. Л.: Химия, 1989. 384 с.
35. Денкер И.И., Владимирский В.Н.. Технология окраски самолетов и вертолетов гражданской авиации. 2-е изд., перераб. и доп. М.Машиностроение. 1988. 128 стр.
36. Железняк В.Г. Современные лакокрасочные материалы для применения в изделиях авиационной техники // Труды ВИАМ. 2019. №5(77), стр. 62-67.
37. Кондрашов Э.К., Кузнецова В.А., Лебедева Т.А., Семенова Л.В. Основные направления повышения эксплуатационных, технологических и экологических характеристик лакокрасочных покрытий для авиационной техники // Российский химический журнал. 2010. Т. 54, №1, стр. 96-102.
38. Меркулова Ю.И. Системы лакокрасочных покрытий для внешней окраски изделий авиационной техники // Многофункциональные лакокрасочные покрытия. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2018. Стр. 22-28.

39. Бухарев Г.М., Бобырева Т.В., Новикова Т.А. Натурные испытания лакокрасочных покрытий на биологическое повреждение и обрастание в условиях умеренного холодного и теплого влажного климата Европейской части России // Коррозия, старение и биостойкость материалов в морском климате. Материалы III Международной научно-технической конференции. 2018. Стр. 30-43.
40. Андреева Н.П., Скирта А.А., Николаев Е.В. Исследование сохраняемости свойств лакокрасочных покрытий авиационного назначения при воздействии климатических факторов в атмосферных условиях // Многофункциональные лакокрасочные покрытия. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2018. Стр. 29-38.
41. Кузнецова В.А., Деев И.С., Железняк В.Г., Силаев А.А. Износостойкое лакокрасочное покрытие с квазикристаллическим наполнителем // Труды ВИАМ. 2018, №3(63), стр. 68-76.
42. Astruc A., Joliff E., Chailan J.-F. et al. Incorporation of kaolin fillers into an epoxy polyamidoamine matrix for coatings// Progress in Organic Coatings. 2009. Vol. 65, pp. 158-168.
43. Кузнецова В.А., Кузнецов Г.В., Шаповалов Г.Г. Исследование влияния молекулярной массы эпоксидной смолы на адгезионные, физико-механические свойства и эрозионную стойкость покрытий // Труды ВИАМ: электрон. научн.-технич. журн. 2014. №8. стр. 8.
44. Кондрашов Э.К., Бейдер Э.Я., Владимирский В.Н. Эрозионностойкие лакокрасочные покрытия. М.: Химия, 1989. 135 стр.
45. Gohardani O. Impact of erosion testing aspects on current and future flight conditions // Progress in Aerospace Science. 2011. Vol. 47, pp. 280-303.
46. Tibor «Anpassung-Integration-Offenheit» // Werkstatt und Betr. 2011. Vol. 144. №7-8, pp. 46-49.
47. Деев И.С., Каблов Е.Н., Кобец Л.П., Чурсова Л.В. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой

- структуры полимерных матриц при механическом нагружении // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №7, стр. 6.
48. Жиликов В.П., Каримова С.А., Лешко С.С., Чесноков Д.В. Исследование динамики коррозии алюминиевых сплавов при испытании в камере солевого тумана (КСТ) // Авиационные материалы и технологии. 2012. №4, стр. 18-22.
49. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2015. №2(35), стр. 76-87.
50. Чеботаревский В.В., Кондрашов Э.К. Технология лакокрасочных покрытий в машиностроении. М.: Машиностроение, 1978. Стр. 214-220.
51. Кузнецова В.А., Силаева А.А., Шаповалов Г.Г., Марченко С.А. Исследование влияния режима пластикации карбоксилатного бутадиен нитрильного каучука и его содержания в полимерной матрице на свойства топливостойкого покрытия // Труды ВИАМ. 2019. №6(78), стр. 65-74.
52. Раскутин А.Е., Хрульков А. В., Язвенко Л. Н. Полимерное пленочное покрытие для конструкций из ПКМ (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. №2(50), стр. 5.
53. Нефедов Н.И., Семенова Л.В., Кузнецова В.А., Веренинова Н.П. Лакокрасочные покрытия для защиты металлических и полимерных композиционных материалов от старения, коррозии и биоповреждения // Авиационные материалы и технологии. 2017. №5, стр. 393-404.
54. Российская энциклопедия СALS. Авиационно-космическое машиностроение / Гл. ред. А.Г. Братухин. М.: ОАО «НИЦ АСК», 2008. 608 стр.
55. Чернышев С.Л., Зиченков М.Ч., Смотрова С.А., Новоторцев В.М., Музафаров А.М. Научно-исследовательская работа, выполненная в ФГУП «ЦАГИ» по итогам 2018г., для участия в конкурсе «Авиастроитель года» в номинации «За создание новой технологии» Технология обнаружения малозаметных ударных повреждений силовых элементов авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов с использованием ударочувствительных полимерных покрытий с оптическими свойствами.

56. Смотрова С. А. Методы и технологии создания специальных покрытий с целью обнаружения малозаметных повреждений агрегатов авиационных конструкций из ПКМ. – Оборонная техника, 2016. №10-11, стр. 66-88.
57. DIN 50359-1. Prüfung metallischer Werkstoffe – Universalhärteprüfung. Teil 1: Prüfverfahren.
58. DIN EN ISO 14577-1. Metallischer Werkstoffe – Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter. Teil 1: Prüfverfahren.
59. Шугуров А. Н., Панин А. В., Оскомов К. В. Особенности определения механических характеристик тонких плёнок методом наноиндентирования // Журнал «Физика твёрдого тела». 2008. Т 50, №6, стр. 1007-1012.
60. Зезин Ю.П., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Экспериментальное исследование изменения механических свойств стальных образцов при нанесении лакокрасочных покрытий // Нелинейный мир. 2011. Т. 9, №7, стр. 436-438
61. Гончукова Н.О. Решение современных задач для системы покрытие-подложка в вязкоупругом приближении // Физико-химия поверхности и защита материалов. 2009. Т. 45, №3, стр. 308317
62. ГОСТ 21631–76. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия.
63. ГОСТ 13726–97. Ленты из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия.
64. Головин Ю. И. Наноиндентирование и механические свойства твёрдых тел в субмикрообъёмах, тонких приповерхностных слоях и плёнках Журнал «Физика твёрдого тела». 2008. Т. 50, №12, стр. 2113-2142.
65. Шугуров А. Н., Панин А. В., Оскомов К. В. Особенности определения механических характеристик тонких плёнок методом наноиндентирования, Журнал «Физика твёрдого тела». 2008. Т 50, №6, стр. 1007-1012.
66. Булычев С.И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием М.: Машиностроение, 1990. 223 стр.

67. Корнев Ю.В., Бойко О.В. Определение механических свойств материалов и покрытий методом наноиндентирования: проблемы, достижения, перспективы // Мезо-, нано-, биомеханика и механика природных процессов. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. №4(2), стр. 473-474.
68. Яновский Ю.Г., Валиев Х.Х., Корнев Ю.В., Карнет Ю.Н., Бойко О.В. Косичкина К.П., Юмашев О.Б. Роль масштабного фактора при изучении механических свойств композиционных материалов с наполнителями // Механика композиционных материалов и конструкций. 2010. Т. 16, №2, стр. 291-304.
69. W. C. Oliver, G. M. Pharr. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // Journal Materials Research. 1992. Vol. 7, №6, pp. 1564 - 1583.
70. Davide Tranchida, Stefano Piccarolo, Joachim Loos, and Alexander Alexeev. «Mechanical Characterization of Polymers on a Nanometer Scale through Nanoindentation // A Study on Pile-up and Viscoelasticity» Macromolecules. 2007. Vol. 40, №4, pp. 1259-1267.
71. Bouchet J., Roche A. A., Hamelin P. Internal stresses, Young's modulus and practical adhesion of organic coatings applied onto 5754 aluminium alloy. 1999. №356, pp. 270–276.
72. Zhou T., Nie P., Lv H., Chen Q., Cai X. Assessment of elastic properties of coatings by three-point bending and nanoindentation // Journal of Coatings Technology Research. 2011. Vol. 8, №3, pp. 355-361.
73. Ang A.S. M., Berndt C.C. A review of testing methods for thermal spray coatings // International Materials Reviews. 2014. Vol. 59, №4, pp. 179-223.
74. Соляев Ю.О., Лурье С.А., Рабинский Л.Н., Мартиросов М.И., Бабайцев А.В. Экспериментально-теоретическое исследование влияния полимерных порошковых покрытий на механические свойства стальных пластин. Механика композиционных материалов и конструкций. 2015. Т. 21, № 2, стр. 197-205.

75. Тимошенко, С. П., Войновский–Кригер С. М. Пластинки и оболочки. М.: Наук, 1966. 636 стр.
76. Тимошенко, С. П. Сопротивление материалов. Т. 1. Элементарная теория и задачи. М.: Наука 1, 1965. 364 стр.
77. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967. 984 стр.
78. Григолюк Э. И., В. М. Толкачев. Контактные задачи теории пластин и оболочек. М.: Машиностроение, 1980. 411 стр.
79. Феодосьев В.И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. М.: Наука, 1973. 400 стр.
80. Тимошенко, С.П., Гере, Д., Механика материалов. СПб.: Лань, 2002. 627 стр.