

На правах рукописи

УМАНСКИЙ Александр Сергеевич



**КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПРОСТРАНСТВЕННО-АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОД-
УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
МЕТОДОМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор

Потапов Анатолий Иванович

Официальные оппоненты:

Решетов Владимир Николаевич

доктор физико-математических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», кафедра электронных измерительных систем, доцент

Федоров Алексей Владимирович

доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», факультет систем управления и робототехники, профессор

Ведущая организация – **ООО «Научно-Технический Центр «ЭТАЛОН»**

Защита диссертации состоится 17 мая 2019 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.224.07 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 15 марта 2019 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Научно технический прогресс в областях, связанных с эксплуатацией техники в экстремальных условиях способствовал распространению практики применения изделий из полимерных композиционных материалов, эксплуатационные и технологические свойства которых обеспечиваются путем подбора состава и свойств наполнителя и матрицы. Новейшим этапом в развитии конструкционных материалов стала разработка пространственно-армированных углеродных материалов, в качестве каркаса в которых используются структура из стержней, сформированных из углеродных нитей и уложенных согласно схеме армирования в нескольких направлениях. Введение стержней в нескольких направлениях армирования позволяет распределять напряжения в элементах конструкций, что, в свою очередь, дает возможность оптимизировать структуру материала и варьировать его физико-механические свойства в широком диапазоне. В данной работе рассматриваются пространственно-армированные композиционные материалы на основе углеродной матрицы с многомерной структурой углеродных армирующих стержней.

Учитывая высокую ответственность изделий из пространственно-армированных углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) особую актуальность приобретают вопросы контроля их качества. При этом требуемые физико-механические и эксплуатационные характеристики изделий должны быть достоверно подтверждены результатами объективного контроля.

Особенностью пространственно-армированных УУКМ является то, что при их проектировании и прочностных расчетах используются характеристики упругих свойств (в частности, модуль упругости) компонентов, значения которых определяются либо косвенными методами, либо путем верификации расчетных моделей на экспериментальных данных. Вместе с тем, в реальных изделиях в зависимости от технологии их изготовления, указанные характеристики могут отличаться от заданных. Упругие свойства УУКМ зависят от четырех характеристик: продольного E_{11} и поперечного E_{12}

модулей упругости, модуля продольного сдвига G_{12} стержней и модуля упругости E_m матрицы. Для подтверждения соответствия механических характеристик компонентов (стержней) УУКМ в готовых изделиях требованиям конструкторской документации необходимо определять эти характеристики методами неразрушающего контроля. В связи с особенностью структуры исследуемого материала и малыми линейными размерами компонентов пространственно-армированных УУКМ (диаметр армирующего стержня $\sim 0,5 \div 0,7$ мм) для определения модуля упругости предложено использовать метод инструментального индентирования, не требующий измерения размеров восстановленного отпечатка с помощью оптического микроскопа. Эта особенность позволяет проводить измерения в области микро- и нанометровых механических деформаций, а также контролировать свойства материалов с высокой степенью упругого восстановления. Значительный вклад в разработку и популяризацию метода инструментального индентирования внесли отечественные и зарубежные ученые и специалисты И. Снеддон, Н.А. Стишвелл, Д. Табор, С.И. Булычев, В.П. Алехин, М. Х. Шорошов, М.Ф. Дорнер, В.Д. Никс, В.С. Оливер, Г.М. Фарр, Ю.И. Головин.

Несмотря на развитие метода инструментального индентирования, его метрологического обеспечения и приборов, реализующих данный метод, тема контроля локальных механических свойств пространственно-армированных УУКМ относительно слабо освещена в научной литературе. Модели, применяемые в методиках расчета значений твердости и модуля упругости, решены для случая внедрения индентора, описываемого как тело вращения гладкой функции, в однородное упругое полупространство. Применение этих моделей для расчета механических свойств пространственно-армированных УУКМ может влиять на достоверность полученных значений твердости и модуля упругости. Таким образом задача гарантированного обеспечения требуемой неопределенности результатов измерений механических свойств при контроле пространственно-армированных УУКМ методом инструментального индентирования по-прежнему остается актуальной.

Объект исследования армирующие стержни пространственно-армированных УУКМ.

Предмет исследования контроль продольного модуля упругости армирующих стержней УУКМ.

Цель работы: разработка методики контроля локальных механических свойств пространственно-армированных углерод-углеродных композиционных материалов.

Идея работы: применение инденгоров с плоской вершиной для контроля продольного модуля упругости стержней пространственно-армированных углерод-углеродных композиционных материалов позволяет учесть влияние особенностей структуры стержня при проведении измерения, а также реализовать корректную с точки зрения решаемой задачи схему нагружения.

Задачи исследований:

1. Проанализировать существующие расчетные методики и программно-аппаратные средства твердомеров по методу инструментального инденгирования;

2. Теоретически обосновать рациональность использования метода инструментального инденгирования для решения задачи инденгирования в стержни пространственно-армированных УУКМ и провести анализ контролируемых и мешающих параметров;

3. Разработать математическую модель, описывающую контактную задачу внедрения инденгора в армирующий стержень УУКМ и анализ упруго-пластических свойств УУКМ;

4. Провести экспериментальное исследование процесса инденгирования армирующих стержней УУКМ, произведенных с соблюдением технологического процесса и с нарушением технологического процесса;

5. Разработать методику контроля локальных механических свойств пространственно-армированных УУКМ.

Научная новизна работы:

1. Впервые выполнены экспериментальные исследования и теоретический анализ процесса взаимодействия армирующих стержней в структуре пространственно-армированных УУКМ с ин-

дентором Берковича и индентором с плоской вершиной, позволившие предложить новую схему измерения механических свойств методом инструментального индентирования.

2. Разработаны математическая модель, описывающая контактную задачу внедрения индентора в армирующий стержень УУКМ, и численная модель упруго-пластического поведения УУКМ при индентировании, отличающиеся тем, что в них использован индентор с плоской вершиной.

3. Разработана и экспериментально обоснована процедура измерения продольного модуля упругости стержней пространственно-армированных УУКМ в структуре материала методом инструментального индентирования с использованием плоского индентора, позволяющая учитывать неоднородность и анизотропию стержня, а также реализовать корректную с точки зрения решаемой задачи схему нагружения.

4. По результатам теоретического и экспериментального анализа разработана методика технологического контроля качества пространственно-армированных УУКМ, основанная на измерении локальных механических свойств армирующих стержней в структуре композитного материала.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Использование инденторов с плоской вершиной для измерения механических свойств стержней пространственно-армированных углерод-углеродных композиционных материалов методом инструментального индентирования позволяет учесть влияние особенностей структуры стержня, а также реализовать корректную с точки зрения решаемой задачи схему нагружения.

2. Предложенная схема измерения и описывающая ее математическая модель взаимодействия индентора с плоской вершиной и контролируемым материалом позволяют измерять продольный модуль упругости стержня методом инструментального индентирования.

3. Разработанная методика измерения продольного модуля упругости стержней пространственно-армированных УУКМ, осно-

ванная на применении индентора с плоской вершиной и предложенных математических и численных моделях, позволяет контролировать механические свойства армирующих стержней и их взаимодействие с матрицей и может быть использована для технологического контроля изделий из пространственно-армированных УУКМ.

Методы исследования

Теоретические исследования построены на использовании основных положений механики контактного взаимодействия. Используемый математический аппарат содержит элементы линейной алгебры и математической статистики. Экспериментальные исследования включали в себя натурные испытания на образцах, изготовленных с нарушением и без нарушения технологического процесса.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в разработке и апробации:

1. Теоретической и расчетной модели измерения продольного модуля упругости стержней пространственно-армированных УУКМ методом инструментального индентирования с использованием индентора с плоской вершиной.

2. Алгоритмов поэлементной калибровки измерительной установки и оценки расширенной неопределенности результатов измерений.

3. Методики измерения продольного модуля упругости стержней пространственно-армированных УУКМ.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается теоретически и экспериментально обоснованными физико-математическими моделями, используемыми при расчетах измеряемых величин, и большим объемом экспериментальных данных.

Личный вклад автора: заключается в постановке целей и задач теоретических и экспериментальных исследований, формулировке научных положений, непосредственном участии в проведении экспериментов, интерпретации полученных результатов и создании на их основе методики измерения продольного модуля упругости стержней пространственно-армированных углерод-углеродных ком-

позиционных материалов и методики технологического контроля изделий из пространственно-армированных УУКМ.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы доложены на 1-й дистанционной научно-технической конференции НККМ-2014 «Приборы и методы неразрушающего контроля качества изделий и конструкций из композиционных и неоднородных материалов», (г. Санкт-Петербург, 2014 г.), III-й Международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.), IV-й Международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.), XXI-й Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике (г. Москва, 2017 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, 3 из них – в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем диссертации: 127 страниц печатного текста и список используемых источников из 89 наименований. В основной состав диссертации входят 8 таблиц и 52 рисунка.

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель, задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведен анализ современного состояния методов и средств измерения физико-механических свойств композиционных материалов.

Структура рассматриваемых в данной работе пространственно-армированных углерод-углеродных композиционных материалов представляет собой гетерофазную систему, состоящую из армирующих компонентов и углеродной матрицы. Матрица УУКМ связывает армирующие элементы и позволяет материалу наилучшим образом воспринимать различного рода внешние нагрузки. Арми-

рующие компоненты представляют из себя стержни диаметром $\approx 0,5 \dots 0,7$ мм, которые в свою очередь состоят из углеродных волокон (филаментов). Филаменты представляют собой углеродные нити, диаметром 5-6 мкм. В соответствии со схемой армирования стержни могут укладываться в нескольких направлениях. В качестве примера рассмотрим структуру с четырьмя направлениями армирования, три из которых x_1, x_2, x_3 лежат в одной плоскости под углом 60° , а четвертое направление z расположено в перпендикулярной плоскости (Рисунок 1).

В настоящее время наиболее сложной и наименее проработанной задачей является измерение физико-механических свойств стержней различных осей армирования пространственно-армированных УУКМ непосредственно в структуре изделия. Эти данные необходимы для построения структурных моделей материалов, прочностных расчетов и математического моделирования изделий и конструкций из УУКМ, что делает данную задачу одной из приоритетных.

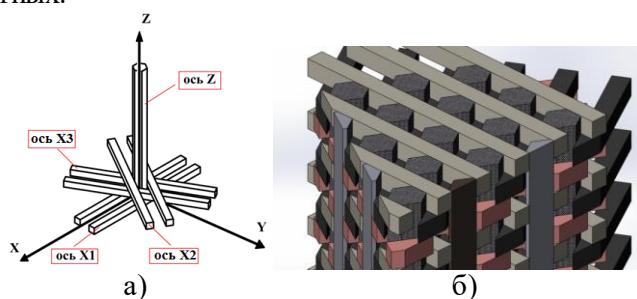


Рисунок 1 – а) Схема расположения осей армирования относительно ортогональной системы координат б) модель структуры УУКМ

Для решения поставленной задачи контроля локальных механических свойств стержней осей армирования УУКМ, учитывая малые геометрические размеры компонентов и особенности их строения, наиболее перспективным методом контроля механических свойств является метод инструментального индентирования.

Во второй главе приведено описание метода инструментального индентирования, анализ контролируемых параметров и источников неопределенности результатов измерений и результаты экспериментов с использованием индентора Берковича.

Применяемый в стандартизованном (в соответствии с ISO 14577) методе инструментального индентирования алгоритм расчета твердости и модуля упругости основан на математической модели для случая индентирования в однородное упруго-пластическое полупространство. На основании теоретического анализа и результатов экспериментов было установлено, что упруго-пластические деформации при индентировании в торцевой срез стержней не соотносятся с данной моделью в масштабе исследуемой области. При индентировании в торцевой срез стержня индентором Берковича филаменты стержня испытывают как сжимающие, так и изгибающие нагрузки, что неизбежно происходит раздвиганию филаментов под вершиной индентора, к разрушению их касательными напряжениями и уплотнению фрагментов совместно с матрицей (Рисунок 2).



Рисунок 2 – схематическое изображение случая индентирования стержня УУКМ пирамидой Берковича

Присутствующие в материале дефекты (поры, трещины, несплошности) и особенности структуры стержней УУКМ (пространственная анизотропия) критически влияют на результаты измерений при индентировании пирамидой Берковича и не позволяют однозначно интерпретировать полученные в ходе экспериментов данные. На основании проведенного анализа и экспериментов сделан вывод, что особенности структуры стержней УУКМ не позволяют напрямую использовать общепринятый подход для определения модуля упругости при индентировании E_r .

Для уменьшения влияния структурной неоднородности и дефектности стержней, а также реализации более корректной с точки зрения решаемой задачи схемы нагружения при инструментальном индентировании предложено использовать индентор в виде усечённого конуса с плоской вершиной с диаметром контактирующей поверхности 100 мкм. К тому же, применение индентора с плоской вершиной позволит исключить поправочные коэффициенты в расчетной модели, связанные с функцией формы индентора и уменьшить тем самым неопределенность результатов измерений.

В третьей главе представлено теоретическое обоснование применения индентора с плоской вершиной и построена расчетно-теоретическая модель взаимодействия плоского индентора со стержнем в структуре УУКМ.

В стандартизированной расчетной методике важным фундаментальным допущением, является то, что формула, описывающая упругую разгрузку плоского заполненного полупространства, применяется также для описания индентированной поверхности, а математическое описание упругой нагрузки и разгрузки индентированной поверхности совпадает с описанием плоской поверхности, с некоторыми дополнениями в геометрических параметрах, описывающих угол при вершине конуса.

Для осесимметричных инденторов модуль E_r вычисляется из формулы:

$$S = \frac{dP}{dh} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A}, \quad (1)$$

где, $S = \frac{dP}{dh}$ экспериментально измеренная жесткость верхнего участка кривой разгрузки, E_r приведенный модуль упругости, значение которого близко к значению модуля Юнга материала (модуля продольной упругости), A расчетная площадь упругого контакта.

Так как усеченный конус является осесимметричным индентором, подставив в формулу $A = \pi a^2$, где a это радиус индентора на глубине индентирования h , получим:

$$\frac{dP}{dh} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{\pi a^2} \quad (2)$$

Упростив данное выражение, получим:

$$E_r = \frac{P}{2ah} \quad (3)$$

Полученное выражение применимо для расчета при индентировании плоским цилиндрическим индентором, для которого радиус a на глубине индентирования является постоянным (Рисунок 3).



Рисунок 3 – Схема индентирования плоским индентором

Для обоснования теоретической модели взаимодействия плоского индентора и стержней УУКМ была построена расчетная модель взаимодействия плоского индентора со стержнем в структуре пространственно-армированного УУКМ. Для расчета распространения упругой деформации в объеме стержня и матрицы, а также распределения давления в зоне контакта индентора и стержня использовался программный модуль ANSYS/Mechanical. В качестве одного из параметров в модель введен коэффициент трения между стержнем и матрицей, позволяющий учитывать степень адгезии между ними. В рамках описываемой модели нагрузка на индентор линейно возрастает в течение 5 секунд до достижения максимальной силы в 2,9 Н, при этом происходит упругий контакт индентора и стержня и взаимодействие стержня и матрицы. Индентор представляет собой усеченный конус с углом при вершине 110° и диаметром плоского штампа 100 мкм. Решение задачи проводилось в двумерной постановке с применением метода конечных элементов. Стер-

жень и матрица в двумерной постановке представлены прямоугольниками с граничными условиями на неконтактных поверхностях. Свойства материала индентора (алмаз): модуль упругости $E = 1 \times 10^{12}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,046$. Свойства стержня и матрицы приняты усредненными по данным из открытых источников. Свойства материала стержня: модуль упругости $E = 3,5 \times 10^{10}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$. Свойства материала матрицы: модуль упругости $E = 9,5 \times 10^9$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,34$. На рисунке 4 представлено состояние системы при нагрузке 2,9 Н.

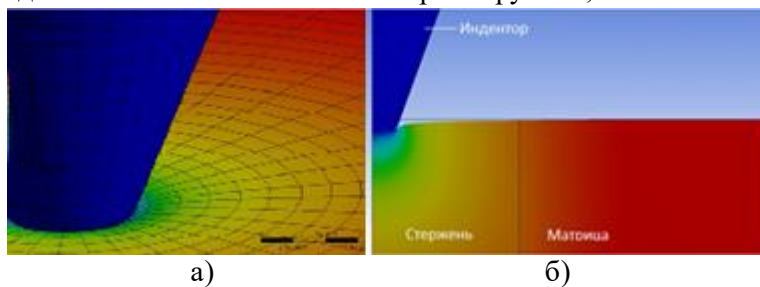


Рисунок 4 – Состояние системы при нагрузке 2,9 Н а) в трехмерной постановке, б) в двумерной постановке

Исходя из результатов решения задачи индентирования в образец с высокой степенью адгезии стержня и матрицы (коэффициент трения стержня по матрице=0,1) получено, что в диапазоне нагрузок от 0 до 1,37 Н область распространения деформации под индентором находится в границах стержня УУКМ. Дальнейшее повышение нагрузки приводит к тому, что область деформации постепенно начинает распространяться за границы матрицы, вызывая ее смещение по оси Y совместно со стержнем. При достижении максимальной нагрузки в 2,9 Н деформация матрицы относительно ее начального положения на границе стержень-матрица составляет порядка 2,5 мкм.

В ходе решения задачи были выявлены рабочие диапазоны нагрузок. Для измерения локальных механических свойств стержня пространственно-армированных УУКМ в матрице прикладываемая в

ходе испытаний нагрузка не должна превышать определенное значение, которое для выбранных в представленной расчетной модели параметров находится в диапазоне от 0 до 1,37 Н. Для измерения локальных механических свойств ячейки стержень-матрица необходимо прикладывать нагрузку больше 2,5 Н.

Степень адгезионного взаимодействия стержня и матрицы зависит от пропитки армирующей структуры в ходе технологического процесса. Уменьшение степени адгезионного взаимодействия влияет на прочностные и механические характеристики композита. Для расширенного понимания механизмов взаимодействия системы стержень-матрица, было произведено моделирование процесса внедрения плоского индентора в систему стержень-матрица для системы с уменьшенной степенью адгезионного взаимодействия. В представленной расчетной модели коэффициент трения между стержнем и матрицей был уменьшен на порядок до значения 0,01.

Из результатов моделирования следует, что в диапазоне нагрузок до 1,67 Н система стержень-матрица ведет себя аналогично предыдущей модели с большим коэффициентом трения. Однако, с возрастанием нагрузки более 1,67 Н происходит «отрыв» стержня от матрицы и постепенное его смещение относительно матрицы, которое при максимальной нагрузке в 2,9 Н составило 100 нм. Этот процесс иллюстрирует диаграмма на рисунке 5.

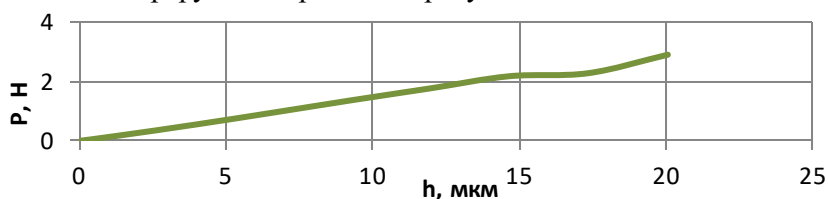


Рисунок 5 – Диаграмма нагрузка-внедрение для процесса нагружения, полученная с помощью расчетной модели для случая с низким коэффициентом трения

В четвертой главе приведены результаты измерений свойств УУКМ методом инструментального индентирования с применением плоского индентора. Обоснована возможность примене-

ния предложенной методики измерения модуля упругости для технологического контроля пространственно-армированных УУКМ.

Исследовались образцы УУКМ с пространственным армированием по четырем осям, изготовленные с различными параметрами технологического процесса, отличающиеся степенью пропитки стержней углеродной матрицей и, как следствие, обладающие разной степенью адгезии стержней к матрице. Подготовка образцов для исследования заключается в изготовлении шлифа, перпендикулярного заданной оси армирования. Оптические изображения поперечных срезов стержней оси Z приведены на рисунке 6. Стержень в образце с низкой степенью адгезии (рисунок 6 а) отслоен от матрицы (видна четкая граница отслоения практически по всей окружности стержня). Стержень с высокой степенью адгезии (рисунок 6 б) лучше пропитан матрицей и не имеет четкой границы стержень-матрица

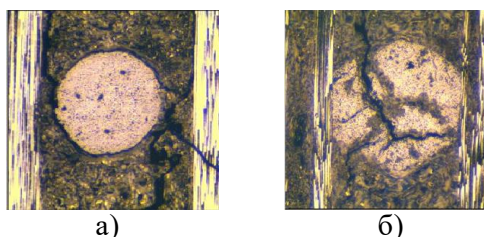


Рисунок 6 – Оптические изображения торцевых срезов стержней (ось Z) в образцах а) с низкой степенью адгезии, б) с высокой степенью адгезии, размер поля 1×1 мм

Для обоих образцов проводились индентирования с нагрузками 100, 200, 500, 800, 900, 1000, 1300, 1500 Н. Индентирование проводилось в центральную область стержня, чтобы воспроизвести условия расчетной модели. Для каждого значения нагрузки было проведено по 5 индентирований в торцы разных стержней оси Z , затем рассчитывалось среднее значение.

Зависимость значений модуля упругости E_r от прикладываемой нагрузки P , измеренных с помощью плоского индентора на образце с высокой адгезией приведена на рисунке 7.

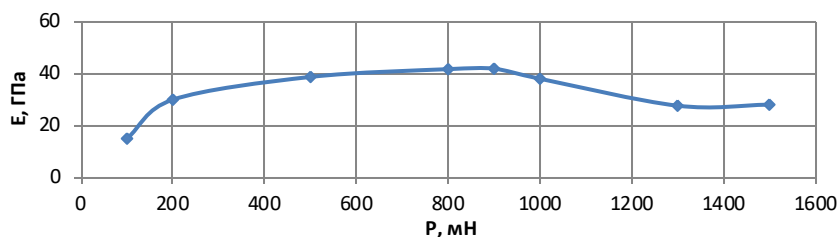


Рисунок 7 – Зависимость измеренного значения модуля упругости E_r от прикладываемой нагрузки P для образца с высокой степенью адгезии

Из приведенной зависимости следует, что измеряемые с помощью плоского индентора значения модуля упругости постепенно увеличиваются до нагрузки в 800 мН и выходят на «плато» до нагрузки 900 мН, что связано, по-видимому, с уплотнением филаментов в области воздействия индентора. Данный результат коррелирует с результатами численного моделирования, где в диапазоне нагрузок от 0 до 1,37 Н область распространения деформации под индентором находится в границах стержня УУКМ. При увеличении прикладываемой нагрузки выше 900 мН измеряемые значения модуля упругости стержней уменьшаются и выходят на «плато» в диапазоне нагрузок 1300-1500 мН. Снижение значений модуля упругости в рамках предложенной модели объясняется влиянием на результат измерений упругих свойств матрицы при увеличении области деформации под индентором. Этот результат также коррелирует с результатами численного моделирования, где на участке выше нагрузки 1,37 Н до нагрузки 2,5 Н происходит увеличение размеров области упругой деформации стержня с одновременным вовлечением в процесс деформирования материала матрицы с низким значением модуля упругости. Это приводит к изменению характера зависимости после нагрузки в 2,5 Н, в связи с возрастающей степенью влияния матрицы на результаты экспериментов.

Зависимость измеренных значений модуля упругости E_r от прикладываемой нагрузки P , измеренных с помощью плоского ин-

денгора на образце с низкой степенью адгезии приведены на рисунке 8.

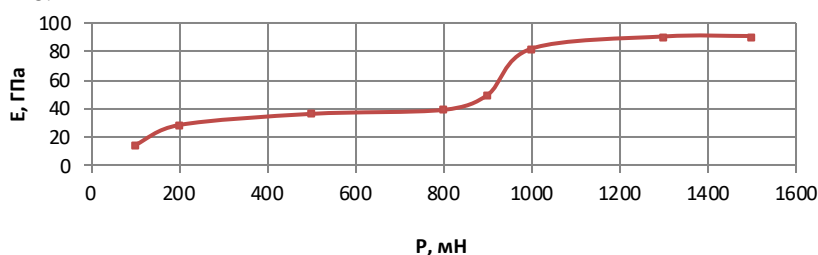


Рисунок 8 – Зависимость измеренного значения модуля упругости E_r от прикладываемой нагрузки P для образца с низкой степенью адгезии

Как видно из представленной зависимости в диапазоне нагрузок до 800 мН система стержень-матрица ведет себя аналогично образцу с высокой адгезией. При увеличении нагрузки выше 800 мН происходит резкое возрастание измеряемых значений модуля упругости стержня. В диапазоне нагрузок 1300-1500 мН зависимость выходит на «плато». Увеличение измеряемых значений модуля упругости может быть связано с тем, что при возрастании нагрузки выше 800 мН происходит «отрыв» стержня от матрицы с последующим его уплотнением. Дальнейшее увеличение модуля упругости и выход зависимости модуля упругости от нагрузки на «плато» может быть связан с достижением предельного уплотнения стержня в матрице. Данный результат подтверждается расчетной моделью, где «срыв» происходил при нагрузке около 2 Н.

Исходя из полученных результатов следует, что для измерения модуля упругости стержней пространственно-армированных УУКМ и технологического контроля механических свойств стержней рабочим диапазоном прикладываемой нагрузки является диапазон 800-1000 мН. В диапазоне 800-900 мН можно измерить продольный модуль упругости стержня без учета влияния матрицы и дефектности стержня на результат измерений. В целях технологического контроля изделий из УУКМ следует проводить контрольные

измерения при нагрузке в 1000 мН. В случае получения завышенных значений модуля упругости в диапазоне нагрузок от 900 до 1000 мН, можно судить о недостаточной степени адгезионного взаимодействия на границе стержень-матрица. Полученные значения рабочих нагрузок применимы для серии образцов, используемых в данной работе. В случае измерения модуля упругости образцов, изготовленных по другому техпроцессу, рабочий диапазон нагрузок может отличаться.

В пятой главе приведены основные положения методики измерения продольного модуля упругости стержней пространственно-армированных УУКМ, включающие в себя поэлементную калибровку средства измерения (твердомера), подготовку образцов и расчет расширенной неопределенности результатов измерений.

Описаны алгоритмы калибровки измерительных каналов датчиков силы и перемещения. Предложены 2 методики расчета неопределенности твердомера: поэлементная и с использованием аттестованных мер (стандартных образцов) механических свойств.

Для расчета суммарной неопределённости результатов измерений использована методика оценки неопределенности результатов измерений по результатам поэлементной калибровки.

Составляющими расширенной неопределенности результатов измерений являются значения среднеквадратического отклонения, которыми характеризуются калибровочные коэффициенты, по которым рассчитываются значения:

$$Probe_f = (k_{Scales_Probe} \pm \Delta k_{Scales_Probe}) \cdot Scales \quad (4)$$

$$Probe_d = (k_{Stage_Probe} \pm \Delta k_{Stage_Probe}) \cdot Stage_d \quad (5)$$

Δk_{Scales_Probe} – составляющая неопределенности результатов измерений, связанная с разбросом значений калибровочного коэффициента измерительного преобразователя по силе;

Δk_{Stage_Probe} – составляющая неопределенности результатов измерений, связанная с разбросом значений калибровочного коэффициента пьезоактюатора по перемещению;

Δa – составляющая неопределенности результатов измерений, связанная с разбросом значений функции формы индентора.

Суммарная стандартная неопределенность результатов измерений U , полученная расчетным способом будет равна:

$$U = \sqrt{\left(\frac{dU}{dProbe_f} \Delta k_{Scales_Probe}\right)^2 + \left(\frac{dU}{dProbe_d} \Delta k_{Stage_Probe}\right)^2 + \left(\frac{dU}{da} \Delta a\right)^2} \quad (6)$$

Суммарная стандартная неопределенность твердомера составила $U_{калиб} = 2,8 \%$. Приведены результаты проведенных измерений в соответствии с описанной методикой. Среднеквадратическое отклонение результатов серии измерений составляет не более 4%.

Суммарная расширенная неопределенность разработанной методики с коэффициентом охвата 2 оценена как геометрическая сумма случайной составляющей результатов измерений, вычисленной по экспериментальным данным и систематической неопределенности твердомера, вычисленная по результатам поэлементной калибровки рассчитывается как:

$$U_{сумм} = k \cdot \sqrt{U_{отн}^2 + U_{изм}^2} \quad (7)$$

и составляет не более 10 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предложено решение актуальной научно-технической задачи измерения продольного модуля упругости компонентов пространственно-армированных УУКМ и разработки методики контроля качества УУКМ. На основании проведенных исследований получены следующие научные результаты работы:

1. На основании теоретического, расчетного и экспериментального анализа подтверждена возможность и целесообразность применения индентора в форме усеченного конуса для решения задачи индентирования и определения модуля упругости при индентировании стержней УУКМ.

2. Разработана физико-математическая модель описывающая контактную задачу внедрения плоского индентора в армирующий

стержень УУКМ и численная модель упругого поведения УУКМ при индентировании;

3. На основании результатов математического моделирования и экспериментальных исследований разработана методика измерения локальных механических свойств пространственно-армированных УУКМ;

4. На основании результатов математического моделирования и экспериментальных исследований разработана методика технологического контроля стержней УУКМ.

Список наиболее значимых публикаций, в которых изложены основные результаты диссертационной работы
Статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России:

1. Потапов А.И., Гоголинский К.В., Сясько В.А., Уманский А.С., Кондратьев А.В. Методические и метрологические аспекты измерения механических свойств материалов методом инструментального индентирования // Контроль. Диагностика, 2016. № 8. С. 16-21.

2. Потапов А.И., Гоголинский К.В., Кондратьев А.В., Уманский А.С. Косвенная оценка функции формы индентора для контроля физико-механических свойств методом инструментального индентирования // Контроль. Диагностика, 2017. № 2. С. 28-32.

3. Гоголинский К.В., Шипша В.Г., Сясько В.А., Уманский А.С., Васильев В.А. Применение метода инструментального индентирования для определения упругих характеристик армирующих компонентов пространственно-армированных углерод-углеродных материалов // Естественные и технические науки, 2018. №4(118). С. 201-205.