

## ОТЗЫВ

официального оппонента

профессора факультета систем управления и робототехники

федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский  
университет информационных технологий, механики и оптики»

доктора технических наук **Федорова Алексея Владимировича**

на диссертационную работу **Уманского Александра Сергеевича** на тему:  
«Контроль механических свойств пространственно-армированных углерод-  
углеродных композиционных материалов методом инструментального  
индентирования», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля  
природной среды, веществ, материалов и изделий (отрасль наук – технические  
науки)

На отзыв представлены том рукописи диссертации на 127 листах (125 листов  
основного текста), и автореферат на 20 страницах.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы,  
включающего 89 наименований, и двух приложений.

Рассмотрение и анализ представленных материалов, а также опубликованных  
работ по теме диссертации позволили сформулировать следующий отзыв на  
диссертацию.

### **Актуальность темы диссертации**

Совершенствование конструкций современной техники предъявляет к  
используемым в них материалам повышенные требования по жесткости и  
прочности, массе, ресурсу эксплуатации, в том числе в агрессивных средах при  
температурах выше 2000°C и в условиях скоростных газовых потоков. В настоящее  
время данным требованиям вполне удовлетворяют углерод-углеродные  
композиционные материалы (УУКМ), пространственные структуры которых  
обеспечивают направленную анизотропию свойств конечного материала, а

№147-10  
от 11.04.2019

требуемые механические и теплофизические свойства УУКМ обеспечиваются типом пространственного армирования композита. На качество конструкций из пространственно-армированных УУКМ влияет большое количество факторов: свойства материалов отдельных компонент, вид армирования, способ создания углеродного каркаса, способ и параметры технологического процесса изготовления, технический уровень оборудования и пр. Следует также отметить, что особенностью пространственно-армированных УУКМ является то, что при их проектировании и прочностных расчетах используются механические характеристики упругих свойств компонентов (модули упругости), значения которых определяются либо косвенными методами, либо путем верификации расчетных моделей на основе экспериментальных данных, а для подтверждения требований к упругим свойствам компонент УУКМ и композита в целом целесообразно применять методы неразрушающего контроля.

На современном этапе для неразрушающего контроля механических свойств различных материалов все более широкое применение находит метод инструментального индентирования (ИИ), который позволяет проводить измерения в области микро- и нанометровых механических деформаций без оценки восстановленного отпечатка оптическими методами. Однако, несмотря на развитие метода ИИ, его метрологического обеспечения и приборов, реализующих данный метод, задача обеспечения требуемой неопределенности результатов измерений значений механических характеристик при контроле пространственно-армированных УУКМ не решена в окончательном виде.

В связи с этим тема диссертационной работы Уманского А.С., посвященная разработке методики контроля локальных механических свойств пространственно-армированных УУКМ методом ИИ является своевременной и актуальной. Диссертационная работа Уманского А.С. имеет как научную, так и практическую значимость в этом направлении, а задачи, решаемые автором защищаемой диссертации, непосредственно направлены на повышение качества продукции и заслуживают внимания в условиях современного развития науки и техники, как с теоретической, так и с практической точек зрения.

## Общая характеристика работы

Содержание работы построено в соответствии с решением поставленных задач. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и двух приложений.

Во введении автор обосновывает актуальность темы работы, определяет ее цель и задачи, формулирует идею работы, раскрывает научную новизну работы и практическую ценность ее результатов.

В первой главе диссертации проведен анализ современного состояния методов и средств контроля физико-механических свойств композиционных материалов. Показано, что в настоящее время наиболее сложной и наименее проработанной задачей является измерение значений характеристик упругих свойств стержней различных осей армирования пространственно-армированных УУКМ. Для решения поставленной задачи, учитывая малые геометрические размеры компонентов и особенности их строения, обоснованно предлагается использовать метод ИИ.

Во второй главе приведено описание особенностей использования метода ИИ применительно к задачам измерения твердости и модуля упругости. Проведен анализ источников неопределенности результатов измерений и мешающих факторов. Показано, что на результаты измерений твердости и модуля упругости УУКМ существенным образом влияют шероховатость поверхности, особенности упруго-пластической деформации, анизотропия свойств и дефектность испытуемых объектов, контактная жесткость. Приведены результаты экспериментов, которые показали, что стандартизованный алгоритм оценки показателей механических свойств не применим для случая индентирования в стержни УУКМ. Для уменьшения влияния структурной неоднородности и дефектности стержней, а также реализации более корректной с точки зрения решаемой задачи схемы нагружения при ИИ предложено использовать плоский индентор в форме усеченного конуса.

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

В четвертой главе представлены результаты измерений приведенного модуля упругости стержней УУКМ методом ИИ с применением плоского индентора в форме усеченного конуса. Показано, что для корректного измерения продольного модуля упругости стержня испытательная нагрузка должна лежать в диапазоне от 600 до 900 мН, а для технологического контроля степени адгезионного взаимодействия на границе стержень-матрица - в диапазоне от 900 до 1100 мН.

В пятой главе приведены основные этапы методики измерения продольного модуля упругости стержней УУКМ, включающие в себя методику поэлементной калибровки измерительной установки (твердомера), правила подготовки образцов, методику расчета расширенной неопределенности результатов измерений.

В заключении представлены основные научные результаты работы.

В приложениях приведены Заключение и Справка о внедрении результатов диссертационного исследования.

#### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна**

На основе анализа состояния проблемы контроля механических свойств пространственно-армированных УУКМ автор обоснованно и корректно сформулировал цель и взаимосвязанные задачи исследований.

Исследования проводились на основе применения методов теории механики контактного взаимодействия, линейной алгебры и математической статистики, экспериментальных методов (натурных испытаний образцов, изготовленных с нарушением и без нарушения технологического процесса). Данный выбор является обоснованным и методически правильным.

В процессе исследований автором были получены следующие **научные результаты**:

- 1) усовершенствованный метод ИИ с использованием плоского индентора в форме усеченного конуса для контроля механических свойств стержней пространственно-армированных УУКМ, позволяющий учесть влияние особенностей структуры стержня, а также реализовать корректную с точки зрения решаемой задачи схему нагружения;

2) схема измерения и описывающая ее математическая модель взаимодействия плоского индентора в форме усеченного конуса и контролируемым материалом, позволяющие измерять продольный модуль упругости стержня УУКМ методом ИИ;

3) методика измерения продольного модуля упругости стержней пространственно-армированных УУКМ, основанная на применении плоского индентора в форме усеченного конуса и предложенных моделях, которая позволяет контролировать механические свойства армирующих стержней и их взаимодействие с матрицей и может быть использована для технологического контроля изделий из пространственно-армированных УУКМ.

**Достоверность и обоснованность** научных положений, выводов и рекомендаций определяется корректностью постановки задач исследований; применением теоретически и экспериментально обоснованных физико-математических моделей, используемых при расчетах; результатами экспериментальных исследований и их сходимостью с результатами теоретического анализа; признанием основных положений диссертации широким кругом специалистов при апробировании материалов исследований на конференциях, а также результатами внедрения разработанных модели, методики и алгоритма.

**Научная новизна** результатов диссертации заключается в следующем:

1. Впервые выполнены экспериментальные исследования и теоретический анализ процесса взаимодействия армирующих стержней в структуре пространственно-армированных УУКМ с индентором Берковича и плоского индентора в форме усеченного конуса, позволившие предложить новую схему измерения механических свойств методом ИИ.

2. Разработана новая расчетно-теоретическая модель, описывающая контактную задачу взаимодействия индентора со стержнем в структуре УУКМ, отличающаяся от известных моделей тем, что использовался плоский индентор в форме усеченного конуса.

3. Разработана и экспериментально обоснована процедура измерения продольного модуля упругости стержней пространственно-армированных УУКМ в

структуре материала методом ИИ с использованием плоского индентора, позволяющая учитывать неоднородность и анизотропию стержня, а также реализовать корректную с точки зрения решаемой задачи схему нагружения.

4 Разработана методика измерения продольного модуля упругости стержней УУКМ, включающая в себя методику поэлементной калибровки измерительной установки (твердомера), правила подготовки образцов, методику расчета расширенной неопределенности результатов измерений.

**Теоретическая ценность научных результатов** диссертации характеризуется тем, что они вносят вклад в развитие методов неразрушающего контроля механических свойств материалов, в части учета дополнительных влияющих факторов (структурной неоднородности и дефектности стержней УУКМ) и разработки новых способов выполнения измерений (использование плоского индентора в форме усеченного конуса).

**Практическая значимость** выполненной диссертационной работы заключается в том, что применение алгоритмов поэлементной калибровки измерительной установки, оценки расширенной неопределенности результатов измерений и методики измерения продольного модуля упругости стержней позволяют обеспечить измерительный и технический контроль изделий из пространственно-армированных УУКМ. Следует отметить, что основные теоретические и прикладные результаты работы ориентированы, в конечном счете, на повышение качества продукции. Основные результаты работы реализованы в ООО «Константа» и Учреждении науки «Инженерно-конструкторский центр сопровождения эксплуатации космической техники», о чем свидетельствуют Заключение и Справка о внедрении результатов диссертационного исследования. Данные результаты в дальнейшем могут быть использованы при разработке, производстве и эксплуатации микро-нанотвердомеров, разработке технологий контроля механических свойств материалов и изделий.

Вместе с тем, исходя из анализа содержания текста диссертации и автореферата, диссертационная работа содержит ряд **недостатков и замечаний**:

1. Результаты компьютерного моделирования контактного взаимодействия плоского индентора в форме усеченного конуса с армирующим стержнем УУКМ с использованием программного модуля ANSYS/Mechanical приведены в виде рисунков, в то время как можно было их продублировать в таблицах с оценкой анализируемых параметров.

2. Методика контроля продольного модуля упругости стержней пространственно-армированных УУКМ на основе использования метода ИИ и микро-нанотвердомеров, в том числе серии «Константа-МНТ», предполагает специальную подготовку образцов для испытаний. Что в свою очередь означает невозможность технического контроля механических свойств материала стержней непосредственно на изделии.

3. Представленные результаты экспериментальных исследований по измерению продольного модуля упругости армирующих стержней индентором с плоской вершиной не подтверждены результатами разрушающих или неразрушающих испытаний альтернативными методами. Что вызывает сомнение в точности измерений и достоверности результатов контроля.

4. В работе используются различные единицы измерения прикладываемой нагрузки: Н (п. 2.7.1) и г (п. 2.7.2).

Приведенные выше недостатки и замечания не оказывают существенного влияния на общую положительную оценку диссертационной работы.

Результаты исследований достаточно полно опубликованы в 8 печатных работах, из них 3 печатных работы в изданиях, рекомендуемых ВАК. В совместных работах вклад соискателя является определяющим. Достижения других авторов использованы корректно с указанием ссылок на конкретные публикации.

Содержание автореферата достаточно полно отражает содержание диссертации и позволяет составить целостное представление о проделанной работе. Материалы диссертации изложены достаточно грамотно, логически последовательно и представлены в лаконичной форме.

## Заключение

Диссертация Уманского А.С. является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научно-технической задачи, заключающейся в разработке методики контроля локальных механических свойств пространственно-армированных УУКМ методом ИИ и направленной на повышение качества продукции. Решение данной задачи обеспечивает усовершенствование метода ИИ, разработку приборов ИИ с учетом особенностей УУКМ, разработку метрологического обеспечения приборов ИИ.

Считаю, что диссертационная работа Уманского Александра Сергеевича полностью соответствует критериям п.9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 01.10.2018), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (отрасль наук – технические науки).

Официальный оппонент,  
доктор технических наук,  
профессор факультета систем управления и робототехники  
Университета ИТМО

«01» сентября 2019 года

Федоров Алексей Владимирович



*Федорова Н.В.*

*И.И. Шенникова*

Почтовый адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49,

Телефон: +7(812) 595-41-48

Адрес электронной почты: [avfedorov@corp.ifmo.ru](mailto:avfedorov@corp.ifmo.ru)

*02.04.2019.*

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»**

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

+7 (812) 232-23-07

[od@mail.ifmo.ru](mailto:od@mail.ifmo.ru)