



Механика деформируемого твердого тела в проектировании материалов и конструкций

Программа и тезисы докладов

7 – 8 ноября 2024



Пермь, 2024

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Научный центр мирового уровня «Сверхзвук»,

«Институт механики сплошных сред Уральского отделения
Российской академии наук» – филиал
Пермского федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской академии наук
(«ИМСС УрО РАН»)

Механика деформируемого твердого тела в проектировании материалов и конструкций

Программа и тезисы докладов

7- 8 ноября 2024 г.

Пермь, 2024

УДК [539.3](063)

Механика деформируемого твердого тела в проектировании материалов и конструкций. Пермь, 7 – 8 ноября 2024г. Программа и тезисы докладов /ПФИЦ УрО РАН. – Пермь, 2024. – 160с.

Представлены программа и тезисы докладов конференции «Механика деформируемого твердого тела в проектировании материалов и конструкций», проводимой «Институтом механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиалом Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии

Сборник отражает тематику конференции и содержит результаты исследований по актуальным проблемам вычислительной механики деформируемого твердого тела, механике композиционных и функциональных материалов, мониторингу деформационного поведения конструкций.

Материалы, представленные в сборнике, могут быть полезны научным работникам, а также студентам и аспирантам, специализирующимся в области механики сплошных сред.

Издается в авторской редакции.

ISBN 978-5-6052105-5-9

Издается по решению Ученого совета «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук

Ответственный за выпуск: Н.А. Юрлова

© ИМСС УрО РАН, 2024 г.
© Авторы, 2024 г.



Научный комитет

Матвеев В.П. (ИМСС УрО РАН, НЦМУ «Сверхзвук», Пермь) – председатель

Бабешко В.А. (КГУ, Краснодар)

Барях А.А. (ПФИЦ УрО РАН, Пермь)

Беляев А.К. (ИПМаш РАН, Санкт-Петербург)

Буренин А.А. (ИММ ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре)

Васильев В.В. (МАИ, НЦМУ «Сверхзвук», Москва)

Горячева И.Г. (ИПМех РАН, Москва)

Калинчук В.В. (ЮНЦ РАН, Ростов-на-Дону)

Келлер И.Э. (ИМСС УрО РАН, Пермь)

Кривцов А.М. (СПбПУ, Санкт-Петербург)

Ломакин Е.В. (МГУ, Москва)

Мулюков Р.Р. (ИПСМ РАН, Уфа)

Назаров Е.В. (МАИ, НЦМУ «Сверхзвук», Москва)

Пантелеев И.А. (ИМСС УрО РАН, НЦМУ «Сверхзвук», Пермь)

Плехов О.А. (ИМСС УрО РАН, НЦМУ «Сверхзвук», Пермь)

Сапожников С.Б. (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ», НЦМУ «Сверхзвук», Челябинск)

Трусов П.В. (ПНИПУ, Пермь)

Фрейдин А.Б. (ИПМаш РАН, НЦМУ «Сверхзвук», Санкт-Петербург)

Шаныгин А.Н. (ЦАГИ, НЦМУ «Сверхзвук», Жуковский)

Шардаков И.Н. (ИМСС УрО РАН, НЦМУ «Сверхзвук», Пермь)

Юрлова Н.А. (ИМСС УрО РАН, НЦМУ «Сверхзвук», Пермь)

7 ноября, четверг

9:15-9:30	Открытие конференции		
9:30 - 11:00	Пленарное заседание 1	Зал БОН	
11:00 – 11:20	<i>Кофе-брейк</i>		
11:20 --12:50	Пленарное заседание 2	Зал БОН	
13:00 - 14:00	<i>Обед</i>		
14:10 - 15:40	Секционные заседания		
	Секция 1 / Заседание 1 (Зал БОН)	Секция 2 / Заседание 1 (ауд. 233)	Секция 3 / Заседание 1 (ауд.203)
15:40 - 16:00	<i>Кофе-брейк</i>		
16:00 - 17:30	Секционные заседания		
	Секция 1 / Заседание 2 (Зал БОН)	Секция 2 / Заседание 2 (ауд. 233)	Секция 3 / Заседание 2 (ауд.203)

9:15 - 9:30	Открытие работы конференции	
	ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ 1	Стр.
9:30 - 10:00	Зиченков М.Д., Шаныгин А.Н. Использование нелинейных методов для решения задач прочности про-бионических конструкций планера СПС Докладчик: Шаныгин Александр Николаевич	17
10:00 - 10:30	Сапожников С.Б. Оценка опасности локального ударного воздействия на про-бионическую композитную сетчатую оболочку с использованием ВОД Докладчик: Сапожников Сергей Борисович	18
10:30 - 11:00	Каменских А.О., Лекомцев С.В., Матвеев В.П., Юрлова Н.А. Численное моделирование smart-конструкций на основе пьезоэлектрических материалов и сплавов с памятью формы Докладчик: Лекомцев Сергей Владимирович	20
	ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ 2	
11:20 - 11:50	Дементьев В.Б., Липанов А.М. Раскрытие резервов существующих материалов на основе ВТМО винтовым обжатием Докладчик: Дементьев Вячеслав Борисович	22
11:50 - 12:20	Ломакин Е.В., Федулов Б.Н., Федоренко А.Н. Нелинейные модели деформирования и повреждения композитных материалов Докладчик: Ломакин Евгений Викторович	24
12:20 - 12:50	Фрейдин А.Б., Рублев И.А., Иванова А.Б., Михеев Е. Связанные задачи хемомеханики для локализованных и объемных химических реакций Докладчик: Фрейдин Александр Борисович	26
	СЕКЦИОННЫЕ ЗАСЕДАНИЯ	
	Секция 1 Вычислительная механика в проектировании материалов и конструкций	
	<i>Заседание 1</i>	
14:10 – 14:25	Гавва Л.М., Корольский В.В., Фирсанов В.В. Диапазон размеров и шага стрингеров, толщин монослоёв и схем укладки пакетов при оптимальном проектировании композитных панелей несущих поверхностей летательных аппаратов с ограничениями на основе уточнённой теории устойчивости Докладчик: Гавва Любовь Михайловна	39

14:25 – 14:40	Федоренко А.Н., Юргенсон С.А., Федулов Б.Н., Ломакин Е.В. Проектирование и оптимизация конструкции крыла сверхзвукового пассажирского самолета Докладчик: Федоренко Алексей Николаевич	41
14:40 – 14:55	Левченков М.Д. Разработка алгоритма оптимизации сетчатых панелей про-бионической конструкции крыла СПС Докладчик: Левченков Михаил Дмитриевич	44
14:55 – 15:10	Форенталь Г.А., Сапожников С.Б. Трёхмерное армирование слоистых тканевых композитов с помощью фелтинга Докладчик: Форенталь Галина Анатольевна	45
15:10 – 15:25	Каменских А.О., Лекомцев С.В., Матвеев В.П. Численный анализ динамического поведения пологих оболочек под действием температурной нагрузки Докладчик: Каменских Александр Олегович	47
15:25 – 15:40	Бочкарев С.А., Сенин А.Н. Конечно-элементный анализ динамического состояния дефектной нагруженной оболочки с жидкостью Докладчик: Сенин Александр Николаевич	49

Секция 1 Вычислительная механика в проектировании материалов и конструкций

Заседание 2

16:00 – 16:15	Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б., Гареев А.Р., Думанский С.А. Численное и аналитическое решения нелинейной задачи теплопроводности Докладчик: Баяндин Юрий Витальевич	51
16:15 – 16:30	Ганзий Ю.В., Чекмышев К.Э. Численное исследование процесса отверждения композитных полимерных материалов Докладчик: Ганзий Юлия Валентиновна	54
16:30 – 16:45	Вяткин Я.В., Трусов П.В. Прямая упруговязкопластическая модель: применение для анализа влияния свободной поверхности на механические свойства кристаллического образца Докладчик: Вяткин Яков Витальевич	56
16:45 – 17:00	Кондратьев Н.С., Балдин М.Н., Трусов П.В. Решение краевых задач с уточнением отклика материала в результате применения аппарата многоуровневого моделирования Докладчик: Балдин Матвей Николаевич	58
17:00 – 17:15	Зайцев А.В., Коуров Р.Н. Оценка прочности горизонтального тяжелого упругого ортотропного цилиндра, находящегося под действием неоднородного бокового внешнего давления Докладчик: Зайцев Алексей Вячеславович	60
17:15 – 17:30	Бояршинов Д.А., Сметанников О.Ю. Вычисление	62

материальных констант вязко-гиперупругой модели поведения амортизационной резины

Докладчик: Бояршинов Дмитрий Альбертович

Секция 2 Контроль и диагностика механического состояния конструкций

Заседание 1

- | | | |
|---------------|--|----|
| 14:10 – 14:25 | Ерофеев В.И., Павлов И.С., Егоров М.А. О специфике явления акустоупругости на примере трехмерной модели конструкционного материала из сферических частиц | 64 |
| | Докладчик: Ерофеев Владимир Иванович | |
| 14:25 – 14:40 | Ерофеева И.В., Ерофеев В.И., Родюшкин В.М. Определение изгибных напряжений в стальных образцах методом акустоупругости с использованием поверхностных волн Рэлея | 65 |
| | Докладчик: Ерофеева Ирина Владимировна | |
| 14:40 – 14:55 | Нец П.А., Евдокимов А.А. Гибридный численно-аналитический подход для решения задач о возбуждении, распространении и дифракции SH-волн в волноводах с множественными неоднородностями | 67 |
| | Докладчик: Нец Полина Алексеевна | |
| 14:55 – 15:10 | Оборин В.А., Банников М.В., Соковиков М.А., Наймарк О.Б. Кинетические закономерности роста усталостных трещин в титановых и алюминиевых сплавах при предварительном динамическом и последующем сверхмногоцикловом нагружении | 69 |
| | Докладчик: Оборин Владимир Александрович | |
| 15:10 – 15:25 | Ефремов Д.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Статистический анализ сигналов сонолюминесценции и метод регистрации кавитации | 71 |
| | Докладчик: Ефремов Денис Викторович | |
| 15:25 – 15:40 | Уваров С.В. Изменение эффективной скорости звука в композитном материале как признак деградации свойств | 73 |
| | Докладчик: Уваров Сергей Витальевич | |

Секция 2 Контроль и диагностика механического состояния конструкций

Заседание 2

- | | | |
|---------------|--|----|
| 16:00 – 16:15 | Белянкова Т.И., Ворович Е.И., Калинин В.В. Об особенностях формирования волновых полей на поверхности электромагнитоупругой пластины из функционально-градиентных материалов | 75 |
| | Докладчик: Белянкова Татьяна Ивановна | |
| 16:15 – 16:30 | Анджикович И.Е., Турчин А.С. Мониторинг расслоения среды по параметрам поверхностного-волнового поля | 77 |
| | Докладчик: Турчин Артем Сергеевич | |

16:30 – 16:45	Чернов А.В. Исследование ударостойкости защитных элементов сетчатых про-бионических конструкций с учётом ограничений из-за интеграции в конструкцию компонентов встроенной системы мониторинга	79
	Докладчик: Чернов Андрей Владимирович	
16:45 – 17:00	Горбач С.К., Гусев Г.Н. Деформационный мониторинг подземных магистральных трубопроводов на подрабатываемых территориях	80
	Докладчик: Горбач Степан Константинович	
17:00 – 17:15	Яваров А.В., Тяпкина П.А., Федосеев А.В., Лалин В.В. Прямой динамический расчет зданий и сооружений, подверженных кинематическому воздействию буровзрывных работ	82
	Докладчик: Тяпкина Полина Александровна	
17:15 – 17:30	Анискович Е.В. Исследование причин дефектности статорных колонн гидротурбин при длительных сроках эксплуатации	84
	Докладчик: Анискович Евгений Валерьевич	

Секция 3 Совершенствование конструкций на основе новых материалов

Заседание 1

14:10 – 14:25	Дементьев В.Б., Коршунов А.И. Структура технологического процесса ВТМО	87
	Докладчик: Коршунов Александр Иванович	
14:25 – 14:40	Изюмова А.Ю., Вшивков А.Н., Пантелеев И.А., Плехов О.А. Особенности акустической эмиссии при циклическом деформировании образцов после лазерного ударного упрочнения	88
	Докладчик: Изюмова Анастасия Юрьевна	
14:40 – 14:55	Гачегова Е.А., Вшивков А.Н. Влияние материала защитного покрытия на эффективность лазерной ударной проковки	91
	Докладчик: Гачегова Елена Алексеевна	
14:55 – 15:10	Майер А.Е., Вшивков А.Н., Плехов О.А., Манухина К.Д., Родионов Е.С., Майер П.Н. Экспериментальное и численное исследование генерации и затухания ударной волны в меди при лазерном ударном упрочнении	93
	Докладчик: Манухина Ксения Дмитриевна	
15:10 – 15:25	Бартоломей М.Л., Изюмова А.Ю., Гачегова Е.А., Вшивков А.Н., Плехов О.А. Численная оценка профиля остаточных напряжений при двухстороннем симметричном лазерном ударном упрочнении	94
	Докладчик: Бартоломей Мария Леонидовна	
15:25 – 15:40	Буковский П.О., Щербакова О.О., Муравьева Т.И. Исследование твердосмазочных покрытий MOS2-ZRN трибологического назначения	96
	Докладчик: Щербакова Ольга Олеговна	

Секция 3 Совершенствование конструкций на основе новых материалов

Заседание 2

16:00 – 16:15	Широков В.Б., Турчин А.С., Михайлова И.Б., Калинин В.В. Об одном из путей оптимизации гетероструктур LiNbO ₃ /Si для эффективного возбуждения ПАВ Докладчик: Калинин Валерий Владимирович	98
16:15 – 16:30	Бондарчук Д.А., Федулов Б.Н., Ломакин Е.В. Снижение жесткости в слоистых композитных материалах на криволинейных участках поверхности Докладчик: Бондарчук Дарья Александровна	101
16:30 – 16:45	Федулов Б.Н., Бондарчук Д.А., Ломакин Е.В., Федоренко А.Н. Модели отверждения композитов на основе фотополимерного, реактопластичного и термопластичного связующего Докладчик: Федулов Борис Никитович	103
16:45 – 17:00	Тарасова А.С., Ташкинов М.А. Исследование механического отклика цилиндрических ауксетиков при термомеханическом нагружении Докладчик: Тарасова Анастасия Сергеевна	105
17:00 – 17:15	Виндокуров И.В., Ташкинов М.А. Исследование влияния параметров аддитивного производства на механические свойства PLA при сжатии Докладчик: Виндокуров Илья Владимирович	107
17:15 – 17:30	Грибов Д.С., Кондратьев Н.С., Шарифуллина Э.Р., Романов К.А., Балдин М.Н., Вшивкова А.А., Безверхий Д.С., Курмоярцева К.А. Макрофеноменологическое моделирование для определения рациональной градиентной структуры турбинного диска ГТД Докладчик: Грибов Дмитрий Сергеевич	109

8 ноября, пятница

9:30 - 11:00	Пленарное заседание 3		Зал БОН
11:00 - 11:20	<i>Кофе-брейк</i>		
11:20 - 12:50	Пленарное заседание 4		Зал БОН
13:00 - 14:00	<i>Обед</i>		
14:10 - 15:40	Секционные заседания		
	Секция 1 / Заседание 3 (Зал БОН)	Секция 2 / Заседание 3 (ауд. 233)	Секция 3 / Заседание 3 (ауд.203)
15:40 - 16:00	<i>Кофе-брейк</i>		
16:00 - 16:45	Секционные заседания		
	Секция 1 / Заседание 4 (Зал БОН)	Секция 2 / Заседание 4 (ауд. 233)	Секция 3 / Заседание 4 (ауд.203)
16:45 - 17:00	<i>Закрытие конференции</i>		

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ 3			<i>Стр.</i>
9:30 - 10:00	Наймарк О.Б. Критическая динамика процессов деформирования и разрушения при интенсивных воздействиях Докладчик: Наймарк Олег Борисович		28
10:00 - 10:30	Кривцов А.М. Дискретно-континуальное моделирование сред с микроструктурой и термомеханических процессов Докладчик: Кривцов Антон-Иржи Мирославович		30
10:30 - 11:00	Прочность и разрушение металлополимерных и полимерных композитов Докладчик: Смирнов Сергей Витальевич		31

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ 4

11:20 - 11:50	Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Плужник А.В., Евдокимов В.С, Хрипков Д.А. Асимптотический метод решения контактных задач о действии с трением полуполосового штампа на анизотропный композит Докладчик: Бабешко Владимир Андреевич		32
11:50 - 12:20	Буренин А.А., Ткачева А.В. О расчетах операции сборки с натягом цилиндрических конструкций посредством горячей посадки упругопластических деталей Докладчик: Буренин Анатолий Александрович		35
12:20 - 12:50	Дудин Д.С., Келлер И.Э. Модель высокотемпературной сульфидно-оксидной коррозии жаропрочных сплавов с учетом напряжений Докладчик: Келлер Илья Эрнстович		37

СЕКЦИОННЫЕ ЗАСЕДАНИЯ

Секция 1 Вычислительная механика в проектировании материалов и конструкций

Заседание 3

14:10 – 14:25	Гаришин О.К., Шадрин В.В. Метод «вложенных циклов» для экспериментального исследования механических свойств наполненных эластомеров Докладчик: Гаришин Олег Константинович		111
14:25 – 14:40	Лалин В.В., Ибрагимов Т.Р. Уравнения совместности деформаций для расчета статически неопределимых ферм Докладчик: Лалин Владимир Владимирович		113
14:40 – 14:55	Беляев А.К., Полякова О.Р., Товстик Т.П. Области притяжения в задаче маятника Капицы с внутренними степенями свободы Докладчик: Товстик Татьяна Петровна		115

14:55 – 15:10	Богданов Я.Д., Донгаузер К.А., Сметанников О.Ю. Моделирование напряженно-деформированного состояния керамического стержня в процессе запрессовки модельного состава Докладчик: Богданов Ярослав Даниилович	117
15:10 – 15:25	Ковтанюк Л.В., Панченко Г.Л., Попова Е.О. Необратимое деформирование материала пробки в круглой трубе в неизотермическом случае Докладчик: Попова Елена Олеговна	119
15:25 – 15:40	Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Нестационарные упругодиффузионные колебания консольно-закрепленной пластины Тимошенко под действием распределённой по поверхности нагрузки Докладчик: Земсков Андрей Владимирович	121

Секция 1 Вычислительная механика в проектировании материалов и конструкций

Заседание 4

16:00 – 16:15	Курмоярцева К.А., Трусов П.В. Дислокационно-ориентированное моделирование поведения поликристаллических материалов с учетом межкристаллитных потоков дислокаций Докладчик: Курмоярцева Ксения Александровна	123
16:15 – 16:30	Безверхий Д.С., Кондратьев Н.С. Физическая многоуровневая статистическая модель динамической рекристаллизации и ее применение для описания многостадийной горячей осадки Докладчик: Безверхий Дмитрий Сергеевич	125

16:30 – 16:45

Секция 2 Контроль и диагностика механического состояния конструкций

Заседание 3

14:10 – 14:25	Матвеев В.П., Сероваев Г.С., Галкина Е.Б., Конюхов В.А. Выбор оптимальных параметров для точечных и распределенных волоконно-оптических датчиков с целью повышения точности измерения деформаций Докладчик: Сероваев Григорий Сергеевич	127
14:25 – 14:40	Галкина Е.Б., Сероваев Г.С., Конюхов В.А. Измерение технологических и остаточных деформаций с помощью волоконно-оптических датчиков в образцах, изготовленных по технологии послойного наплавления Докладчик: Галкина Елизавета Борисовна	129
14:40 – 14:55	Федоров А.Ю., Сероваев Г.С., Галкина Е.Б. Определение упругих постоянных строительных материалов при испытании на четырёхточечный изгиб Докладчик: Федоров Андрей Юрьевич	131

14:55 – 15:10	Варелджан М.В., Еремин А.А, Глушков Е.В., Глушкова Н.В. Моделирование процесса возбуждения упругих колебаний в слоистой анизотропной подложке пленочным пьезоэлементом Докладчик: Варелджан Михаил Владимирович	133
15:10 – 15:25	Шардаков И.Н., Шестаков А.П., Глот И.О., Гусев Г.Н., Епин В.В., Цветков Р.В. Сравнение динамических характеристик пьезокерамических актуаторов применительно к вибродиагностике крупномасштабных конструкций Докладчик: Шестаков Алексей Петрович	135
15:25 – 15:40	Гусев Г.Н. Деградация датчиков в системе интеллектуального деформационного мониторинга и метод ее диагностики Докладчик: Гусев Георгий Николаевич	136

Секция 2 Контроль и диагностика механического состояния конструкций

Заседание 4

16:00 – 16:15	Зайцев А.В., Мильхин В.А., Мельников Д.Л., Судаков И.А., Шобей М.М. Фурье- и вейвлет-анализ сигналов виброускорения для определения дефектов подшипников качения Докладчик: Мильхин Владислав Анатольевич	138
16:15 – 16:30	Морозов И.А., Беляев А.Ю., Изюмов Р.И. Наноиндентация жесткого покрытия на полимерной подложке Докладчик: Морозов Илья Александрович	139
16:30 – 16:45	Зайцев А.В., Мельников Д.Л. Эффективные упругие модули остеона и компактной костной ткани человека Докладчик: Мельников Демид Леонидович	140

Секция 3 Совершенствование конструкций на основе новых материалов

Заседание 3

14:10 – 14:25	Поморцева Т.Н., Фагалов А.Р., Беляев А.Ю. Возможность использования цианэфирного связующего ВСТ-1208 для надувных отверждаемых конструкций на орбите Докладчик: Поморцева Татьяна Николаевна	142
14:25 – 14:40	Пелевин А.Г., Комар Л.А., Поморцева Т.Н., Терпугов В.Н. Моделирование механического поведения каркасных элементов рефлектора космического аппарата, созданных на основе препрегов сатинового плетения Докладчик: Терпугов Виктор Николаевич	144
14:40 – 14:55	Сметанников О.Ю., Фасхутдинова Ю.Б., Ильиных Г.В. Проектирование термоусаживаемой трубки из сшитого полипропилена для внутренней изоляции труб Докладчик: Фасхутдинова Юлия Борисовна	146

14:55 – 15:10	Ильиных Г.В., Сметанников О.Ю., Фасхутдинова Ю.Б. Использование термоусаживаемой трубки в качестве фиксирующего ортеза Докладчик: Ильиных Глеб Валентинович	148
15:10 – 15:25	Шейдаков Д.Н., Лыжов В.А., Турчин А.С. Влияние внутренних напряжений в покрытиях на устойчивость составных сферических тел с высокопористой основой Докладчик: Шейдаков Денис Николаевич	150
15:25 – 15:40	Лобов Е.С., Пепеляев А.А., Ташкинов М.А. Влияние параметров волоконного армирования на механические характеристики полимерных материалов, изготовленных методом послойного наплавления Докладчик: Лобов Евгений Сергеевич	152

Секция 3 Совершенствование конструкций на основе новых материалов

Заседание 4

16:00 – 16:15	Шалимов А.С., Ташкинов М.А. Численное исследование поведения при разрушении лигаментов трабекулярной костной ткани и скаффолдов для ее замещения Докладчик: Шалимов Александр Сергеевич	154
16:15 – 16:30	Иванов Е.А., Зайцев А.В. Функциональные накладки на протезно-ортопедическое устройство для компенсации недостающего естественного объема голени человека Докладчик: Иванов Евгений Александрович	156
16:30 – 16:45	Ильиных А.В., Паньков А.М., Лыкова А.В., Сивцева А.В. Статические и циклические свойства аддитивных материалов, полученных методом дуговой наплавки и селективного лазерного сплавления Докладчик: Ильиных Артем Валерьевич	158
16:45 – 17:00	Заккрытие конференции	

Тезисы докладов





ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ ПРО-БИОНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПЛАНЕРА СПС

Зиченков М.Ч., Шаныгин А.Н.

*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский
alexander.shanygin@tsagi.ru*

В работе представлена и обоснована концепция про-бионических конструкций для основных отсеков крыла и фюзеляжа перспективного сверхзвукового пассажирского самолёта, позволяющая удовлетворить, наряду с традиционными, дополнительные ограничения на геометрические и жесткостные параметры планера, связанные с необходимостью снижения звукового удара, не превышая при этом заданные весовые лимиты.

В рамках данной концепции сформулирован окончательный вариант разрабатываемой в рамках НЦМУ многоуровневой концепции защиты ответственных высоконагруженных элементов крыла и фюзеляжа от ударных и климатических воздействий.

В работе также представлена разработанная в проекте методология обеспечения прочности про-бионических конструкций сверхзвукового пассажирского самолёта, основанная на концепции полной защиты ответственных силовых композитных элементов от ударных воздействий, включающая многоуровневый подход [1] при формировании нелинейных полностью автоматизированных расчетных моделей МКЭ.

Для обоснования эффективности описанных выше концептуальных решений, приведены результаты проектировочных исследований прочностных, жесткостных и весовых характеристик крыла и фюзеляжа гипотетического сверхзвукового пассажирского самолёта, разрабатываемого в рамках НЦМУ «Сверхзвук» [2,3] с лучшими весовыми и прочностными характеристиками по отношению к альтернативным конструкциям с традиционными КСС.

Работа подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня “Сверхзвук” на 2020—2025 годы (соглашение от 17 мая 2022 г. № 075-15-2022-1023).

Литература

[1] A. Shanygin, V. Fomin, G. Zamula Multilevel approach for strength and weight analyses of composite airframe structures // 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences 2010, ICAS 2010, 19-24.09.2010.

[2] И.Г. Башкиров, Ю.Н. Чернавских, Г.А. Федоренко, С.Л. Чернышев О выборе параметров перспективного сверхзвукового пассажирского самолета // Выездная секция «Фундаментальные проблемы создания СПС нового поколения» международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики», 9-10 июня 2021г., Сочи.

[3] S.L. Chernyshev, E.A. Dubovikov, A.A. Ionov, I.O. Kondakov, A.N. Shanygin, M.Ch. Zichenkov Basic principles for creating light, efficient and safe structures for the next generation supersonic transport. Acta Astronautica 2023;204:728–737.
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.10.035>.

ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ЛОКАЛЬНОГО УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРО-БИОНИЧЕСКУЮ КОМПОЗИТНУЮ СЕТЧАТУЮ ОБОЛОЧКУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОД

Сапожников С.Б.^{1,2}

¹Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

²Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е.Жуковского, г. Жуковский, Московская область

sapozhnikovsb@susu.ru

Оценка состояния ответственных композитных конструкций невозможна без установки в критические места сенсоров на основе тензо-, пьезо- или волоконно-оптических датчиков (ВОД) [1,2]. Запрос в SCOPUS по теме *fiber optic sensor for aerospace* показал наличие более 1000 публикаций, демонстрируя устойчивый рост, начиная с одной в 1984 году до 50 публикаций в 2023 году. Информация с установленных датчиков фиксируется и обрабатывается с целью определения места локального удара [3,4], размера дефекта [5,6] или приближения к катастрофическому разрушению [7,8]. Хрупкость композитов и наличие дефектов в эксплуатации приводят к необходимости вводить дополнительные коэффициенты запаса прочности и снижать потенциально высокую весовую эффективность композитных конструкций.

Для решения отмеченных выше проблем сравнительно недавно [9-11] предложены про-бионические схемы сетчатых оболочек (ПБСО), содержащие не две, а три системы силовых рёбер из однонаправленного композита, защитные накладки на рёбра и внешнюю эластичную обшивку. Силовые рёбра расположены в глубине конструкции и закрыты от внешних ударов обшивкой, лежащей на защитной накладке, рис.1.

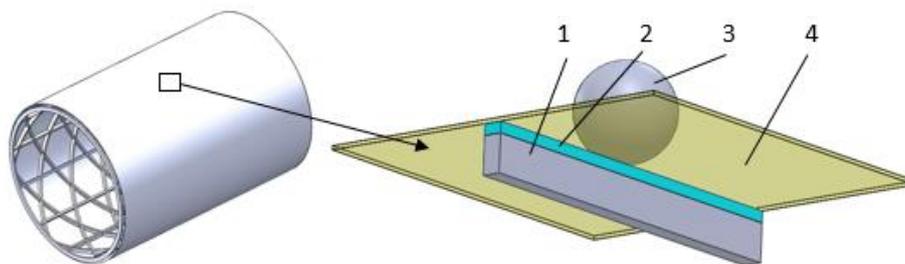


Рис.1. ПБСО и её фрагмент: ребро (1), защитная накладка (2), ударник (3) и обшивка (4).

При локальном ударе эластичная обшивка прогибается не разрушаясь, а накладка демпфирует удар, растягивая импульс и уменьшая контактную нагрузку [11].

В данной работе при локальном ударе сетчатая оболочка представлена в виде эквивалентной гладкой оболочки [9]. Результаты расчёта переданы на детализированную модель фрагмента оболочки, состоящего из силового ребра, содержащего слои однонаправленного композита, прослойки матричного полимера, защитную накладку и обшивку. Прослойки матричного полимера и защитная накладка наделены упругопластическими свойствами. Слои однонаправленного композита и обшивка – ортотропные упругие среды. Расчёты МКЭ показывают, что расположение ВОД непосредственно на ребре не даёт необходимой точности, тогда как установка сенсора в защитную накладку, изготовленную из

термопластичного полимера, полностью решает задачу. Локализованные сенсоры (ВОД на решётках Брэгга) должны быть установлены с высокой частотой (через 1-2 см по длине ребра), чтобы указывать место удара, что технически трудно выполнимо. Распределённые ВОД (на рассеянии Бриллюэна) обладают большим преимуществом, позволяя и указывать место удара по зафиксированной остаточной деформации и оценивать важнейший параметр удара – энергию.

В расчётах на методическом примере (широкофюзеляжный пассажирский самолёт) показано, что размещение оптоволокну для фиксации остаточных деформаций в зоне удара должно быть в верхней части накладке у границы с обшивкой. В случае локального удара с энергией 50 Дж максимальные деформации оптоволокну не превысят 2%.

Имеется монотонная зависимость остаточных деформаций накладки от энергии удара. При уменьшении энергии удара с 50 до 5 Дж остаточные деформации в зоне ВОД уменьшаются с 2,07 до 0,57%.

Литература

- [1] Rocha H., Semprinoschnig C., Nunes J.P. Sensors for process and structural health monitoring of aerospace composites: A review – *Engineering Structures*, 2021. – Vol.237 – 112231.
- [2] Vorathin E., Hafizi Z.M., Che Ghani S.A., Lim K.S. Real-time monitoring system of composite aircraft wings utilizing Fibre Bragg Grating sensor – *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016. – Vol.152 (1) – 012024.
- [3] Goossens S., Berghmans F., Muñoz K., et al. A global assessment of barely visible impact damage for CFRP sub-components with FBG-based sensors – *Composite Structures*, 2021. – Vol.272 – 114025.
- [4] Datta A., Augustin M.J., Gupta N., et.al. Impact Localization and Severity Estimation on Composite Structure Using Fiber Bragg Grating Sensors by Least Square Support Vector Regression - *IEEE Sensors Journal*, 2019. – Vol.19 (12), pp. 4463 – 4470.
- [5] Díaz-Maroto P.F., Fernández A., Larrañaga B., Guemes A. Free-edge delamination location and growth monitoring with an embedded distributed fiber optic network - *8th European Workshop on Structural Health Monitoring, EWSHM*, 2016. - Vol.2, pp. 993 – 1001.
- [6] Sun C.T., Dicken A., Wu H.F. Characterization of impact damage in ARALL laminates - *Composites Science and Technology*, 1993 – Vol.49 (2), pp. 139 - 144.
- [7] Nyman T., Bredberg A., Schön J. Equivalent damage and residual strength for impact damaged composite structures (2000) *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 19 (6), pp. 428 - 448.
- [8] Chen V.L., Wu H.-Y.T., Yeh H.-Y. A parametric study of residual strength and stiffness for impact damaged composites - *Composite Structures*, 1993 - 25 (1-4), pp. 267 – 275.
- [9] Vasiliev V.V., Barynin V.A., Razin A.F. Anisogrid composite lattice structures - Development and aerospace applications - *Composite Structures*, 2012. – Vol.94 (3), pp. 1117 – 1127.
- [10] Shanygin A., Zichenkov M., Kondakov I. Main benefits of pro-composite layouts for wing and fuselage primary structure units - *29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2014*.
- [11] Kondakov I.O., Chernov A.V., Shanygin A.N., Sapozhnikov S.B. Protection of aircraft lattice shell made of UD CFRP ribs from low-velocity impacts - *Mechanics of Composite Materials*, 2022. – Vol.57 (6), pp. 721 - 730.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ SMART-КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Каменских А.О., Лекомцев С.В., Матвеев В.П., Юрлова Н.А.

*Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения
Российской академии наук*

kamenskikh.a@icmm.ru, lekomtsev@icmm.ru, mvp@icmm.ru, yurlova@icmm.ru

Оболочки и изделия на их основе широко используются в авиационной, аэрокосмической, автомобильной и других отраслях промышленности. При проектировании различных деталей ставятся задачи определения напряжённо-деформированного состояния и несущей способности тонкостенных конструкций, уменьшения массы изделия при сохранении или даже повышении прочностных и усталостных характеристик. Наряду с этим, рассматриваются вопросы снижения вибраций, демпфирования или предотвращения резонанса. На сегодняшний день с высокой степенью повторяемости возможно не только изготавливать композитные конструкции сложной формы, но и встраивать в них различные пассивные и активные элементы. Изделия, оснащённые сенсорами и актуаторами различного типа, приобретают возможность «чувствовать» деформации, а также изменять свои характеристики (геометрические, механические, динамические) в зависимости от условий эксплуатации, состояния окружающей среды или других факторов. В литературе имеется множество примеров таких smart-систем, построенных на основе пьезоэлектрических материалов [1, 2] и сплавов с памятью формы [3, 4].

В данной работе продемонстрированы некоторые функциональные возможности применения smart-систем в задачах управления геометрией и динамическими характеристиками тонкостенных конструкций. В качестве актуаторов выступают пьезоэлектрические элементы, активные и макроволоконные композиты (AFC и MFC), проволока из сплава с памятью формы. Поиск параметров smart-систем, обеспечивающих максимальную реализацию данных задач, осуществлён с помощью методов математического моделирования.

В примерах рассмотрены упругие и вязкоупругие конструкции с включениями из пьезоматериалов, электромеханическое поведение которых описывается линейной моделью электроупругости. Оценена дополнительная возможность управления динамическим поведением пластин и оболочек за счёт использования присоединённых к электродированным поверхностям пьезоэлементов внешних электрических цепей различных конфигураций [5, 6]. На конструктивно-подобной конструкции продемонстрированы варианты пассивного демпфирования свободных и вынужденных установившихся колебаний при использовании внешней электрической цепи, состоящей из последовательно соединённых сопротивления и индуктивности. Их оптимальные величины подобраны численно с помощью разработанного конечно-элементного алгоритма. Представлены экспериментальные результаты, наглядно демонстрирующие эффективность пассивной системы демпфирования колебаний для разных тонкостенных конструкций. При её изготовлении наряду с традиционными пьезокерамическими элементами использовались пьезопреобразователи на основе макроволоконных композитов. Показана возможность снижения амплитуды вынужденных установившихся гармонических колебаний более чем в шесть раз и увеличение скорости затухания свободных колебаний в два с половиной раза.

С помощью разработанного конечно-элементного алгоритма решена серия задач, в которых продемонстрирована возможность изменения собственных частот колебаний прямоугольной пластины и сегмента полой цилиндрической оболочки в большую и меньшую стороны за счёт использования пьезоэлементов и подачи постоянного электрического напряжения на них [7]. Оценена эффективность данного способа в зависимости от различных геометрических и механических параметров конструкции. Проведена серия натурных экспериментов, направленных на верификацию численного решения.

Проанализирована возможность применения проволочных актуаторов на основе сплава с памятью формы для управления геометрией оболочечных конструкций. Выбрана одномерная модель поведения такого материала и отработана методика идентификации её параметров. Сформулирована математическая постановка и предложен численный алгоритм на её основе, предназначенные для решения задач квазистатического деформирования и собственных колебаний smart-систем на основе материалов с памятью формы. Задача решается в программном обеспечении ANSYS Mechanical APDL с использованием метода конечных элементов. Фазово-структурные деформации учитываются отдельно от упругих в итерационном цикле по доле мартенсита. Влияние пластических и температурных деформаций на НДС проволоки не принимается во внимание. На модельных примерах показана возможность изменения геометрии и управления собственными частотами колебаний тонкостенных оболочек с помощью проволочных актуаторов.

Публикация подготовлена в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020–2025 годы при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (соглашение от 21 апреля 2022 года № 075-15-2022-329).

Литература

- [1] Fleming A.J., Moheimani S.O.R. Piezoelectric transducers for vibration control and damping, 1st ed. – London: Springer, 2006. – 287 p.
- [2] Gripp J.A.B., Rade D.A. Vibration and noise control using shunted piezoelectric transducers: A review // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2018. – Vol. 112. – P. 359–383.
- [3] Abramovich H. Intelligent Materials and Structures. – Berlin: De Gruyter, 2016. – VIII+378 p.
- [4] Kim N.G., Han M.W., Iakovleva A., Park H.B., Chu W.S., Ahn S.H. Hybrid composite actuator with shape retention capability for morphing flap of unmanned aerial vehicle (UAV) // Composite structures. – 2020. – Vol. 243. – 10 p.
- [5] Matveenko V.P., Iurlova N.A., Oshmarin D.A. Damping of vibrations of smart-systems incorporating piezoelectric elements and shunt circuits with parameters derived from the models of continuum and discrete mechanics // Mechanics of Advanced Materials and Structures. – 2023. – 12 p. (online-ready).
- [6] Bochkarev S.A., Lekomtsev S.V. Natural vibration and aeroelastic stability of shallow shells with passive electric circuit // International Journal of Mechanical Sciences. – 2024. – Vol. 269. – 109064.
- [7] Kamenskikh A.O., Lekomtsev S.V., Matveenko V.P. Free vibration of prestressed plates and shallow shells with piezoelectric elements // International Journal of Applied Mechanics. – 2024. – Vol. 16, No. 7. – 2450072.



РАСКРЫТИЕ РЕЗЕРВОВ СУЩЕСТВУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВТМО ВИНТОВЫМ ОБЖАТИЕМ

Дементьев В.Б.¹, Липанов А.М.

¹Удм ФИЦ УрО РАН, Ижевск
demen@udman.ru

Новая техника и оборудование создаваемая для работы в современных условиях должна отвечать повышенным требованиям к эксплуатации. При этом работа деталей подвергается высоким нагрузкам и не выдерживает полный цикл по заданному времени работы изделия. На настоящее время современные конструкционные материалы, созданные в России и за рубежом по эксплуатационным характеристикам, практически исчерпали свои функциональные возможности и находится на пороге своих тактико-технических и конструктивно-технических характеристик ($\sigma_{экс} \approx \sigma_{0,2}$). Особенно это относится к современному вооружению и военной технике (В и ВТ)

В связи с этим, актуальной является проблема развития технологического обеспечения изготовления изделий, испытывающих высокие и экстремальные нагрузки.), что в целом будет определяться уровнем технологии производства и разработкой не только нового по составу и свойствам поколения материалов, но и создание более совершенных упрочняющих технологий, позволяющих полнее использовать скрытые резервы существующих материалов. Эта задача решается на основе комплексного подхода и значительные технологические возможности заложены в процессах термомеханической обработки металлов.

Известные способы пластической обработки решают задачу пластического формообразования в основном используя большие степени обжатия с постоянным силовым воздействием, и использование их с термомеханической обработкой не позволяет получать повышенные механические свойства.

Процесс ВТМО винтовым обжатием используется, как калибровочная операция с небольшими степенями обжатия (15-30%) и одновременно с разнонаправленной деформацией кручения в очаге деформации и закалкой в напряженном состоянии под действием усилий деформации. Это состояние металла позволяет получить на стадии заковки мелкозернистую структуру, а последующий отпуск формирует распределение мелкодисперсных карбидов на нангстром равномерно в мартенситной структуре./1/

Поэтому, в области производства высокопрочных изделий целесообразно ориентироваться на работы по использованию технологии и оборудования процесса ВТМО винтовым обжатием (ВТМО ВО) металлургической заготовки в условиях серийного производства. Изменение механических свойств от силовой схемы деформации при постоянной степени обжатия (20%) для стали 30ХГСН2А приведены в таблице 1.

Из таблицы видно, как меняются свойства при деформации const от силовой схемы деформации. Силовая схема изменяется за счет разницы подач от привода на заготовке и подачи за счет разворота деформирующих роликов $\left(\frac{\beta'}{\beta_P}\right)$.

Таблица 1. Зависимость механических свойств от деформационной схемы

Режимы обработки					Механические свойства							
$t_{деф},$ °C	$\epsilon_{обж},$ %	$t_{отп},$ °C	$\tau, ч$	β'/β_P	$\sigma_B,$ МПа	$\sigma_{0,2},$ МПа	$\delta, \%$	$\psi, \%$	KCU МДж/м ²	$\tau_{нч},$ МПа	$\tau_{нч}^*,$ МПа	HRC
сталь 30ХГСН2А												
960-980	20	200	1,5	0,3	1780±16	1494±8	10,3±1,3	40,3±0,5	0,48±0,03	1440±10	1390±8	47-49
				0,6	1867±5	1532±4	11,0±0,6	37,6±1,5	0,47±0,04	1470±7	1400±7	47-50
				1,0	1856±5	1573±3	12,2±0,4	40,4±1,1	0,54±0,04	1510±10	1390±7	47-49
				1,1	1903±27	1585±6	12,1±0,4	42,1±1,6	0,53±0,02	–	–	47-49
				1,4	1740±10	1530±20	10,2±0,4	42,3±1,6	0,46±0,05	1480±8	1430±6	47-48
				1,7	1806±9	1568±20	10,0±0,6	45,4±1,7	0,60±0,07	1460±10	1390±10	48-50
(ОТО)Закалка, 900°C, масло		200	1,5	–	1750±6	1480±19	9,6±0,7	52,0±1,4	0,70±0,03	–	–	45-47

Показано, что при разнонаправленном деформировании в сочетании деформации по обжатию можно управлять всеми свойствами материала и достигать максимальных значений для всех свойств одновременно, и при этом схемы силового воздействия могут изменяться от винтового протягивания до винтового проталкивания и без осевой силы.

В табл.2 приведены механические свойства трубного проката по оптимальным режимам ВТМО винтовым обжатием в сравнении с требованиями предприятия [2].

Таблица 2- Механические свойства стали 30ХГСН2А трубчатого проката с ВТМО

№№ п/п	Варианты упрочнения	$\sigma_B,$ МПа	$\sigma_{0,2},$ МПа	$\delta,$ %	$\psi,$ %	KCU, Дж/м ²	HRC ₃
1	ВТМО ВО	1859	1667	10,6	56,3	9,3	49-51
2	ТВЧ	≥ 1700	≥1500	≥10	≥52	≥7	47-49

Как видно из табл.2 все механические свойства значительно выше свойств технических условий предприятия.

Литература

- [1] Липанов А.М., Дементьев В.Б., Засыпкин А.Д. К вопросу применения полых пальцев в траках военно-гусеничных машин // Известия РАН. Выпуск 124, № 4, 2022 г. С. 86-91
- [2] Дементьев В.Б., Засыпкин А.Д. Сравнительный анализ методов повышения качества упрочненных трубных и прутковых заготовок для деталей сельхозтехники в журнале // Тракторы и сельхозмашины, издательство Московский политехнический университет (Москва), № 2, с. 52-60

НЕЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПОВРЕЖДЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ломакин Е.В., Федулов Б.Н., Федоренко А.Н.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

evlomakin@yandex.ru fedulov.b@mail.ru, mail@anfedorenko.ru

В ходе нашего исследования были подробно изучены различные формы физической нелинейности, которые непосредственно связаны со структурными особенностями и уровнем поврежденности композитных материалов. Особое внимание было уделено начальным участкам диаграмм деформирования, которые зависят от условий нагружения и не могут быть адекватно охарактеризованы исключительно с помощью тензором констант линейной упругости. На рисунке 1 показаны диаграммы нагружения стеклоткани при различных углах приложения нагрузки и разных типах нагружения (растяжение, сдвиг, сжатие). Видно, что поведение материала существенно различается не только в зависимости от изменения ориентации нагрузки, но и в зависимости от типа нагрузки [1]. На рисунке 2 показаны результаты моделирования известного эксперимента Visagni [2,3] по сжатию подкрепленной цилиндрической оболочки. Видны различные типы потери устойчивости при использовании нелинейной и линейной модели упругого поведения.

В частности, в тех случаях, когда нагрузка прикладывается вдоль направления армирования, наблюдаются практически линейные диаграммы деформирования. Это указывает на то, что в таких условиях композитные материалы проявляют высокую степень упругости и предсказуемости своего поведения.

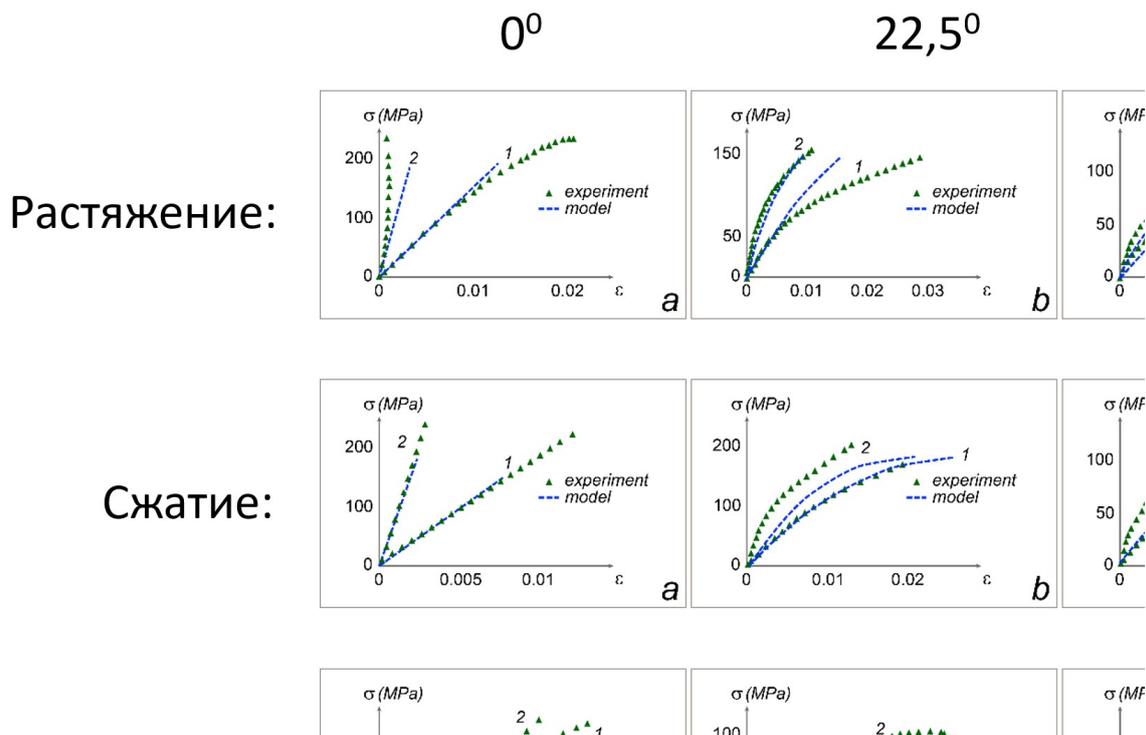


Рис. 1. Диаграммы деформирования стеклоткани при разной ориентации и разных типах нагрузки.

Однако в ситуациях, когда нагрузка осуществляется в условиях сдвига, мы фиксируем значительную нелинейность в поведении материалов. Это подчеркивает важность учета различных режимов нагружения при анализе механических свойств композитов.

Кроме того, в рамках нашего исследования было тщательно проанализировано влияние развития поврежденности на деформационные характеристики и прочность композитных материалов. Мы установили, что существует прямая зависимость прочности от скорости роста поврежденности, что имеет важные последствия для оценки долговечности и надежности композитных конструкций в различных эксплуатационных условиях.

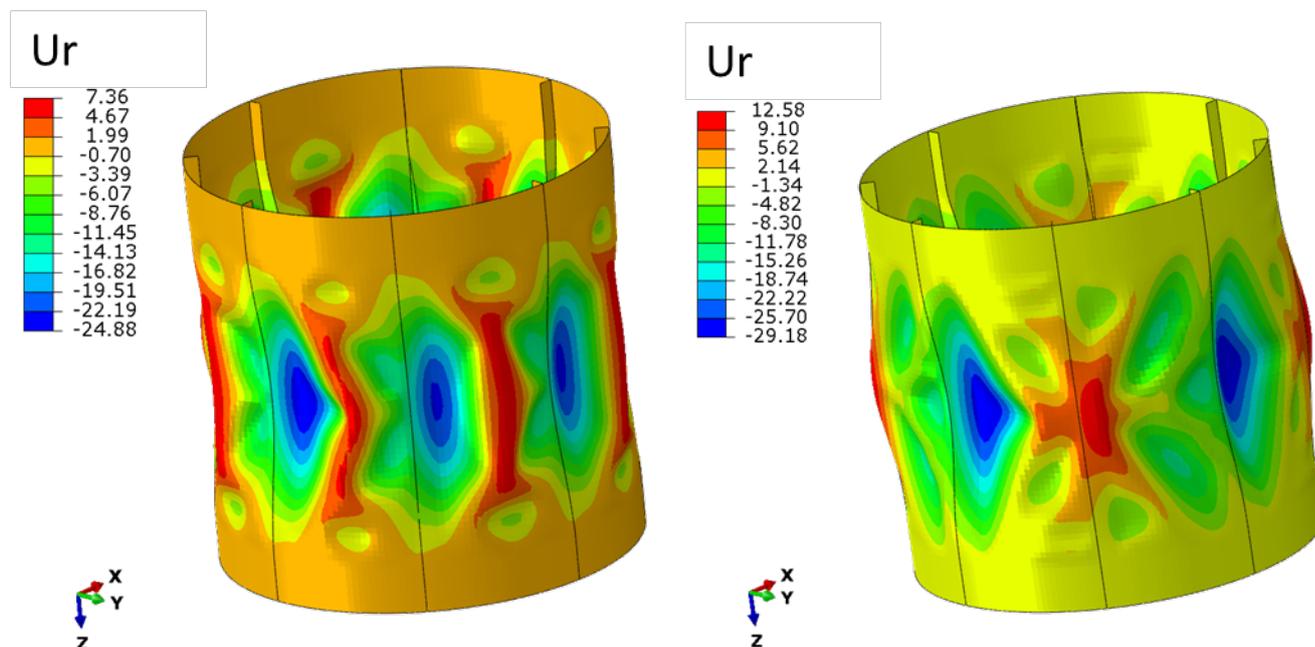


Рис. 2. Радиальные перемещения (мм)

Эти результаты открывают новые возможности для дальнейших исследований в области механики композитных материалов и могут способствовать разработке более эффективных методов их оценки и эксплуатации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 20-11-20230.

Литература

- [1]. Lomakin E. V., Fedulov B. N., Nonlinear anisotropic elasticity for laminate composites // *Meccanica*. – 2015. – Т. 50. – №. 6. – С. 1527-1535.
- [2]. Bisagni C, Cordisco P (2006) Post-buckling and collapse experiments of stiffened composite cylindrical shells subjected to axial loading and torque. *Compos Struct* 73(2):138–149
- [3]. Fedorenko A. N., Fedulov B. N. Effect of elastic properties dependence of the stress state in composite materials // *Aerospace Systems*. – 2019. – Т. 2. – №. 2. – С. 105-109.



СВЯЗАННЫЕ ЗАДАЧИ ХЕМОМЕХАНИКИ ДЛЯ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ И ОБЪЕМНЫХ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

Фрейдин А.Б.¹, Рублев И.А.¹, Иванова А.Б.^{1,2}, Михеев Е.²

¹Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург

alexander.freidin@gmail.com, ilya_rublev@mail.ru, alezandraivanova@mail.ru,
mchave21@outlook.com

Хемомеханика изучает взаимосвязь химических реакций, диффузии и механических напряжений. Литизация кремния в литий-ионных аккумуляторах, окисление кремния в интегральных схемах и полупроводниковых технологиях, образование интерметаллических фаз в бессвинцовых припоях, процессы окисления и разрушения в микромасштабных деталях МЭМС, выполненных из поликристаллического кремния, являются важными примерами реакций между деформируемым твердым материалом и диффундирующим компонентом, сопровождающихся собственной деформацией превращения, генерирующей механические напряжения, которые, в свою очередь, влияют на скорость реакции (см., например, [1-3]). В настоящем докладе сначала рассматривается реакция, локализованная на фронте реакции. Для описания кинетики распространения фронта используется модель, согласно которой напряжения влияют на скорость реакции через тензор химического сродства [3,4]. Обсуждается постановка и приведены примеры решения начально-краевых задач «диффузия–химия–механика», которые демонстрируют, как механические напряжения могут замедлять и блокировать распространение фронта, а также приводить к потере его устойчивости [5,6]. В заключение моделируется объемная химическая реакция, степень завершенности которой связана с параметром фазового поля [7].

Начально-краевая задача описания распространяющегося фронта реакции

Разделяются две стадии реакции: стадия первоначального накопления диффундирующего компонента на границе тела и стадия распространения фронта реакции с момента его отщепления от границы тела до момента полного химического превращения тела или блокирования распространения фронта механическими напряжениями. При этом время начала реакции зависит от напряжений, генерируемых в приповерхностном слое деформацией превращения.

Пространственное распределение диффундирующего компонента в конце первого этапа является начальным условием для второго этапа. На втором этапе рассматриваются и сравниваются формулировки задачи, для которых: (1) диффузия через непревращенный материал не происходит, как, например, в случае литизации кристаллического кремния [8]; (2) диффузия возможна как через превращенный, так и непревращенный материал, причем скорость фронта зависит от концентраций диффундирующего компонента по обе стороны фронта. Для второго случая на фронте реакции помимо баланса массы, уравнивающего скачок диффузионного потока и потребление диффундирующего компонента химической реакцией, обсуждается и ставится дополнительное условие, необходимое для решения задачи диффузии в областях, занятых превращенным и непревращенным материалами. Для осесимметричной задачи сравниваются решения, получаемые в приближении стационарной диффузии и при нестационарной формулировке. Показано, начиная с каких величин

коэффициента диффузии зависимости скорости фронта реакции от положения фронта практически перестают зависеть от величины коэффициента диффузии, что означает переход к режиму распространения фронта реакции, контролируемому в большей степени скоростью реакции, чем диффузией. Это дополнительно обосновывает особое внимание к влиянию напряжений на скорость фронта реакции через влияние на скорость реакции.

Химическая реакция с вязкоупругим продуктом реакции

В простейшей одномерной постановке исследовано влияние внешней деформации и коэффициента вязкости превращенного материала на распространение фронта реакции и релаксацию напряжений в случае вязкоупругого продукта реакции. Это исследование является продолжением работы [9], где исследовался случай пластины, поверхность которой была свободна от внешних напряжений. Рассмотрено распространение и блокирование плоского фронта химической реакции при различных внешних деформациях, в том числе при циклическом нагружении.

Тензор химического сродства и объемные реакции

В случае объемной реакции характерный объем на мезоуровне образован превращенным и непревращенным материалами. Степень превращения является индикаторной функцией на мезоуровне и параметром фазового поля на макроуровне. Показывается, что в этом случае скалярное химическое сродство, определяющее кинетику реакции, может быть вычислено как нормальная компонента введенного ранее тензора химического сродства с нормалью, определяемой градиентом степени превращения. Приводятся примеры единого описания «размазанных» объемных и локализованных реакций.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИПМаш РАН (тема № 124041500009-8)

Литература

- [1] Fang X., Li Y., Yue M. *et al.* Chemo-mechanical coupling effect on high temperature oxidation: A review // *Sci. China Technol. Sci.* – 2019 – V. 62 – P. 1297–1321.
- [2] Tian J., Chen Z, Zhao Y. Review on modeling for chemo-mechanical behavior at interfaces of all-solid-state lithium-ion batteries and beyond // *ACS Omega.* – 2022 – V. 7 – P. 6455–6462.
- [3] Freidin A.B., Vilchevskaya E.N. Chemical affinity tensor in coupled problems of mechanochemistry. In: *Encyclopedia of Continuum Mechanics.* Altenbach H. and Öchsner A. (Eds) Springer Berlin, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-662-55771-6_143
- [4] Freidin A. B. Chemical affinity tensor and stress-assist chemical reactions front propagation in solids. In: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. V. 9: Mechanics of Solids, Structures and Fluids.* – V009T10A102. – 2013.
- [5] Morozov A., Freidin A.B., Müller W.H. On stress-affected propagation and stability of chemical reaction fronts in solids // *Int. J. Engineering Science.* – 2023 – V. 189 – P. 103876.
- [6] Freidin A. B., Rublev I. A., Korolev I. K. Initial-boundary value problem for the propagating chemical reaction front // *Acta Mechanica.* – 2024 – V. 235 – P. 4289–4310.
- [7] Poluektov M., Freidin A.B. Localisation of stress-affected chemical reactions in solids described by coupled mechanics-diffusion-reaction models // *Int. J. Engineering Science.* – 2024 – V. 196 – P. 104006.
- [8] Liu X.H., Wang J.W., Huang S. *et al.* In situ atomic-scale imaging of electrochemical lithiation in silicon // *Nat. Nanotechnol.* – 2012 – V. 7(11) – P. 749–56.
- [9] Petrenko S., Freidin A.B., Charkaluk E. On chemical reaction planar fronts in an elastic – viscoelastic mechanical framework // *Continuum Mech. Thermodyn.* – 2022 – V. 34 – P. 137–163.



КРИТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Наймарк О.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

naimark@icmm.ru

Развитая в [1, 2] статистическая термодинамика сред с дефектами позволила установить новый тип критических явлений — структурно-скейлинговые переходы и соответствующие им типы метастабильных состояний, с реализацией которых связываются качественные изменения дисперсионных свойств, автомодельные механизмы переноса импульса, стадийности развития разрушения. Динамика структурно-скейлинговых переходов, обусловленная формированием коллективных мод дефектов (автосолиitonные и диссипативные структуры обострения), установила качественные изменения дисперсионных свойств, соответствующих появлению «щелевых состояний» (GMS-Gapped Momentum States). Данные состояния формируют пространственные масштабы, на которых реализуются пластические механизмы переноса импульса и диссипации, предшествующие разрушению. Показано, что степенная универсальность пластических волновых фронтов (зависимости Swegle-Grady) в диапазоне скоростей деформаций 10^5 - 10^7 с⁻¹, формирование «волн разрушения», асимптотика вязкости обусловлены реализацией «щелевых состояний» при подчинении механизмов релаксации автомодельным коллективным модам дефектов сдвига. Развитые представления о связи «щелевых состояний» с автомодельными реакциями конденсированных сред при ударно-волновых нагружениях иллюстрируются данными оригинальных экспериментов по регистрации и моделированию степенной универсальности пластических волновых фронтов и кинетики распространения усталостных трещин [3,4], формированием и распространением «волн разрушения», статистическими закономерностями фрагментации [5],

Экспериментальные исследования поведения материалов в широком диапазоне интенсивностей нагружения показывают ограниченность предположения о «адиабатическом подчинении» механических свойств структурным переменным, отражающих поведение дефектов. Процессы деформации при ударно-волновом и динамическом нагружении характеризуются близкими временами нагружения к временам развития дефектов, структурной релаксации, стадийности зарождения трещин и их распространения. Это предполагает рассмотрение процесса деформирования и разрушения в терминах структурных переменных, характеризующих дефекты, включая термодинамику, влияние на релаксационные свойства. Развиты методы многомасштабного анализа структурных изменений, обусловленных дефектами, с использованием данных рентгеновской томографии применительно к широкодиапазонному моделированию поведения материалов.

Работа выполнена в рамках госзадания, регистрационный номер темы 124020200116-1.



Литература

1. Naimark O.B., Defect induced transitions as mechanisms of plasticity and failure in multifield continua // In: Advances in multifield theories of continua with substructure. Ed.: G.Capriz, P.Mariano.- Boston, Birkhauser.- 2004. -P.75-114
- 2.Naimark O., Bayandin Yu., Uvarov S., Bannikova I., Saveleva N. Critical Dynamics of Damage-Failure Transition in Wide Range of Load Intensity // Acta Mechanica. - 2021. - V.232. - P.1943–1959 <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02922-1>
- 3.Bannikov M., Oborin V., Bayandin Yu., Ledon D., Kiselkov D., Savinykh A., Garkushin G., Razorenov S., Naimark O. Damage-failure transition under consecutive dynamic and very high cycle fatigue loads // Journal of Applied Physics. - 2022. - V.131. - P.135902 <https://doi.org/10.1063/5.0085348>
4. Naimark O., Oborin V., Bannikov M., Ledon D. Critical Dynamics of Defects and Mechanisms of Damage-Failure Transitions in Fatigue // Materials. - 2021. - V.14, Is.10. - P.2554 <https://doi.org/10.3390/ma14102554>
5. Davydova M., Uvarov S., Naimark O. The effect of porosity on fragmentation statistics of dynamically loaded ZrO2 ceramics // Frattura ed Integrità Strutturale (Fracture and Structural Integrity). - 2018. - V.12, Is.43. - P.106-112. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.43.08>



ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СРЕД С МИКРОСТРУКТУРОЙ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Кривцов А.М.¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург
akrivtsov@bk.ru

Предлагается описание аналитических и вычислительных методов, направленных на построение дискретных и континуальных моделей для сред с микроструктурой и описания термомеханических процессов в механике дискретных сред. Построена математическая и компьютерная база для описания физико-механических процессов в твердых телах на основе дискретной концепции материала. Разработанные подходы и алгоритмы позволяют с единых позиций описать процессы в конденсированном веществе на различных масштабных уровнях, начиная от наносистем и заканчивая астрофизическими системами. Для описания термомеханических процессов эффективно используется подход энергетической динамики, основанный на аналогии в переносе массы и энергии, и позволяющий получить уравнения баланса потока энергии для различных сред и материалов. Для описания переноса тепла в сверхчистых материалах используются оригинальные стохастические методы описания волновых процессов. Рассматриваются приложения для решения таких прикладных задач, как расчет и оптимизация термомеханических свойств материалов и конструкций, оптимизация технологии нефтедобычи, повышение эффективности измельчения и вибротранспортировки горных пород и др.

ПРОЧНОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Смирнов С.В.

Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, г. Екатеринбург
smirnov.sergy@bk.ru

Расширение области использования адгезионных соединений является перспективным направлением создания композиционных материалов, сотовых и слоистых силовых конструкций, сочетающих высокую прочность и малый вес. Способность противостоять внешним нагрузкам для них во многом определяется уровнем реологических и предельных деформационных свойств. Для адекватного проектирования металлополимерных соединений и упрочненных наполнителями полимеров с использованием современных систем инженерного анализа необходимо иметь сведения о предельных механических свойствах структурных составляющих и их адгезионных соединений при напряженном состоянии, которое может быть реализовано в проектируемых элементах конструкций при эксплуатации или технологической обработки. В настоящее время отсутствуют устоявшиеся представления о влиянии напряженно - деформированного состояния на закономерности когезионного и адгезионного разрушения полимерной матрицы и адгезионных соединений в композитах, которые могли бы быть описаны в категориях механики деформируемого твердого тела. В докладе представлены подходы к решению этой проблемы развиваемые в ИМАШ УрО РАН, рассмотрены особенности проведения механических испытаний для оценки предельных состояний, достигаемых при разрушении по когезионным и адгезионным механизмам.

Описаны особенности использования методик проведения и обработки результатов комплекса механических испытаний на адгезионную прочность путем растяжения модифицированных образцов Аркана и поперечное сжатие склеенных цилиндрических «Brazil-nut-sandwich» образцов, которые описывают адгезионную прочность в условиях нагружения по схемам «растяжение + сдвиг» и «сжатие + сдвиг». Для учета особенностей разрушения слоистых металлополимерных соединений предложено проводить испытания многослойных образцов на трехточечный изгиб с одновременной видеофиксацией процесса деформирования образцов. Предложен критерий разрушения адгезионных соединений, основанный на рассмотрении предельного состояния выделенного микрообъема, содержащего границу соединения материалов. Для оценки влияния напряженного состояния на предельное состояние по механизму когезионного разрушения разработан оригинальный комплекс механических испытаний на растяжение и сжатие образцов специальной формы, которые позволяют проводить испытания в широком диапазоне изменения значений показателей жесткости напряженного состояния и Лоде-Надаи. Для моделирования поведения композитов используется многоуровневый иерархический подход, позволяющий учитывать особенности строения и деформационных свойств структурных составляющих композитов. По результатам проведенных испытаний строятся диаграммы предельной плотности энергии деформации, которые могут быть использованы для проектной оценки ресурса адгезионной и когезионной прочности металлополимерных адгезионных соединений и дисперсно-упрочненных полимерных композитов.

Основные приведенные результаты исследований были получены при выполнении грантов РНФ 19-19-00571 и 24-29-00528.

АСИМПТОТИЧЕСКИЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ О ДЕЙСТВИИ С ТРЕНИЕМ ПОЛУПОЛОСОВОГО ШТАМПА НА АНИЗОТРОПНЫЙ КОМПОЗИТ

Бабешко В. А.¹, Евдокимова О. В.², Бабешко О. М.¹, Плужник А. В.², Евдокимов В. С.¹,
Хрипков Д. А.¹

¹Кубанский государственный университет, Краснодар

²Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону

babeshko41@mail.ru evdokimova.olga@mail.ru babeshko49@mail.ru evdok_vova@mail.ru,
ramblersochi@rambler.ru vestnik@kubsu.ru

В докладе впервые построено асимптотическим методом решение контактной задачи о действии с трением, p - коэффициент трения, жесткого штампа в форме полуполосы на анизотропный многослойный композитный материал. В качестве большого параметра принята относительная ширина полуполосы. Ранее был развит метод для решения задачи в случае полосового штампа большой относительной ширины. Метод оказался эффективным и применен в настоящей работе в контактной задаче для штампа в форме полубесконечной полосы. Рассматриваемые задачи возникают в инженерной практике и строительстве при создании различных объектов, при разработке элементной базы электроники, в сейсмологии, при оценке состояния сейсмичности в зоне перехода горной гряды в равнину. В работе построено решение, правильно отражающее реальное распределение контактных напряжений под штампом, в том числе, в угловых точках полуполосы и стремящееся к точному решению при возрастании параметра ширины полосы.

Постановка задачи. Интегральные уравнения о действии полуполосового штампа на анизотропную среду имеют вид

$$Kq = \int_0^{\infty} \int_{-c}^c k(x-\xi, y-\eta) q(\xi, \eta) d\xi d\eta = f(x, y), \quad 0 \leq x < \infty, \quad -c \leq y \leq c$$

$$k(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K(\alpha, \beta) e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta$$

В общем случае функция $K(\alpha, \beta)$ является комплекснозначной двух комплексных переменных, может иметь особенности в виде полюсов и точек ветвления, не лежащих на контурах интегрирования. Она порождается решением анизотропной граничной задачи в многослойной среде и является непрерывной, суммируемой на осях по обоим аргументам, с поведением на бесконечности вида

$$K(\alpha, \beta) = O(\alpha^{-1}), \quad \beta = const; \quad K(\alpha, \beta) = O(\beta^{-1}), \quad \alpha = const, \quad |\alpha|, |\beta| \rightarrow \infty,$$

Решение рассматриваемой задачи состоит, по опыту решения контактной задачи для полосы [1], в построении решений интегральных уравнений вида

$$\mathbf{K}q_1 = \int_0^{\infty} \int_{-c}^{\infty} k(x-\xi, y-\eta)q_1(\xi, \eta)d\xi d\eta = f_1(x, y), \quad 0 \leq x \leq \infty, \quad -c \leq y \leq \infty$$

$$f_1(x, y) = \begin{cases} f(x, y), & 0 \leq x \leq \infty, \quad |y| \leq c \\ 0 & 0 \leq x \leq \infty, \quad c \leq y \leq \infty \end{cases}$$

$$\mathbf{K}q_2 = \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^c k(x-\xi, y-\eta)q_2(\xi, \eta)d\xi d\eta = f_2(x, y), \quad 0 \leq x \leq \infty, \quad -\infty \leq y \leq c$$

$$f_2(x, y) = \begin{cases} f(x, y), & 0 \leq x \leq \infty, \quad |y| \leq c \\ 0 & 0 \leq x \leq \infty, \quad -\infty \leq y \leq -c \end{cases}$$

$$\mathbf{K}q_3 = \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k(x-\xi, y-\eta)q_3(\xi, \eta)d\xi d\eta = f_3(x, y),$$

$$f_3(x, y) = \begin{cases} f(x, y), & 0 \leq x \leq \infty, \quad |y| \leq c \\ 0, & 0 \leq x \leq \infty, \quad |y| \geq c \\ 0, & -\infty \leq x \leq 0, \quad -\infty \leq y \leq \infty \end{cases}$$

Они решаются методом блочного элемента и позволяют определенной суперпозицией построить асимптотическое решение для $c \gg 1$, [2].

В результате исследований решение представимо в виде

$$q(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [Q_1(\alpha, \beta)e^{-i(\alpha x + \beta y)} - Q_2(\alpha, \beta)e^{-i(\alpha x + \beta(y+c))} - Q_3(\alpha, \beta)e^{-i(\alpha x + \beta(c-y))}] d\alpha d\beta + O(c^{-1})$$

$$Q_1(\alpha, \beta) = K^{-1}(\alpha, \beta)F(\alpha, \beta) + K_{+\alpha}^{-1}(\alpha, \beta)\{K_{-\alpha}^{-1}(\alpha, \beta)F(\alpha, \beta)\}_{-\alpha}$$

$$Q_2(\alpha, \beta) = -\frac{1}{2} [K_{1+\alpha}^{-1} \{ K_{1-\alpha}^{-1} F_1 \}_{-\alpha} + K_{1+\beta}^{-1} \{ K_{1-\beta}^{-1} F_1 \}_{-\beta} + K_{1+\alpha+\beta}^{-1} \{ K_{1+\alpha-\beta}^{-1} \{ K_{1-\alpha}^{-1} F_1 \}_{+\alpha} \}_{-\beta} +$$

$$Q_3(\alpha, \beta) = -\frac{1}{2} [K_{2+\alpha}^{-1} \{ K_{2-\alpha}^{-1} F_2 \}_{-\alpha}$$

В этом представлении участвуют операторы следующего вида

$$\{G(\alpha, \beta)\}_{+\alpha} = \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma_1} \frac{G(\xi, \beta)}{\xi - \alpha} d\xi, \quad \alpha \in \Pi_{\alpha}^{+}, \quad K_{+\alpha}(\alpha, \beta) = \exp \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma_1} \frac{\ln K(\xi, \beta)}{\xi - \alpha} d\xi, \quad \alpha \in \Pi_{\alpha}^{+}$$

Исследование построенного решения показывает, что при удалении зоны наблюдения от границы $x = 0$ под полубесконечным штампом, решение стремится к полученному решению для полосы [1]. При увеличении ширины штампа $2c$, решение стремится к вырожденному, как и в случае полосового штампа. Исследование поведения решения при приближении к прямолинейным границам штампа в форме полуполосы, показало, что концентрация контактных напряжений, с учетом свойства (3), описывается функциями $(\sqrt{y+c})^{-1}$, $(\sqrt{c-y})^{-1}$ и $(\sqrt{x})^{-1}$ при $y \rightarrow -c$, $y \rightarrow c$ и $x \rightarrow 0$, $p = 0$. В угловых точках [3]



$$q(x, y) = O(r^{-\frac{3}{4}-\frac{1}{2}\theta}), \quad r = \sqrt{x^2 + (y \mp c)^2}, \quad \theta = \pi^{-1} \arctg \varepsilon, \quad \varepsilon = (1 - 2\nu)(2(1 - \nu))^{-1} p$$

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда, региональный проект 24-11-20006.

Литература

- [1] Ворович И.И., Александров В.М., Бабешко В.А. Неклассические смешанные задачи теории упругости М., 1974. 456 с.
- [2] Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Евдокимов В.С. Точное решение задачи об акустике в произвольной многослойной среде при контактном взаимодействии с клиновидным штампом // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 4. С. 5–11. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.01
- [3] Бабешко В.А., Глушков Е.В., Зинченко Ж.Ф. Динамика неоднородных линейно-упругих сред. М.: Наука. 1989. 344 с.



О РАСЧЕТАХ ОПЕРАЦИИ СБОРКИ С НАТЯГОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПОСРЕДСТВОМ ГОРЯЧЕЙ ПОСАДКИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Буренин А.А., Ткачева А.В.

*Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре
aab@imim.ru, 4nansi4@mail.ru*

В современном машиностроении в ряду сборки осесимметричных изделий с натягом остается востребованной технологическая операция горячей посадки. Она проста в исполнении: в нагретую до определенной температуры охватываемую деталь сборки помещают холодную охватываемую и предоставляют возможность конструкции остыть до комнатной температуры. Размеры деталей изначально задаются такими, чтобы непосредственно с момента посадки они получили общую цилиндрическую поверхность сопряжения. После остывания по данной поверхности получают достаточно прочное, удовлетворяющее требуемым функциональным качествам соединение. Следовательно ход операции определяются всецело процессом теплопроводности при выравнивании температуры по элементам сборки и процессом отдачи тепла от сопрягаемых деталей при их остывании. Возникающие при этом температурные напряжения создают итоговый натяг в сборке.

Производимое тепло за счет деформирования является, как правило, пренебрежимо малым по сравнению с теплом, полученным при нагреве охватываемой детали сборки. Поэтому расчеты проводятся в рамках несвязанной теории температурных напряжений, когда напряженно-деформированное состояние рассчитывается в зависимости от предварительно найденного распределения температуры. С изменением температуры меняются и напряженно-деформированные состояния, поэтому расчеты проводятся последовательными шагами по времени от момента посадки до полного остывания изделия. В каждый момент времени (на каждом шаге расчетов) находятся уровень и распределение температуры и в зависимости от этого вычисляются температурные напряжения. Когда материал элементы сборки приобретает необратимые (пластические) деформации это может оказаться совсем не простой задачей. Аналитическому её решению в области пластического течения предметно способствует использование классических кусочно-линейных пластических потенциалов: условий максимальных касательных напряжений (условий Треска-Сен-Венана) или условий максимальных приведенных напряжений (условий Ишлинского-Ивлева).

Способствуя в каждый рассматриваемый момент времени проведения технологической операции расчету температурных напряжений кусочно-линейные пластические потенциалы привносят иную трудность в расчеты технологического процесса. Изменяясь, температурные напряжения одномоментно могут переходить от соответствия одной из граней поверхности нагружения к соседнему с ней ребру или соседней грани. Таким способом область пластического течения делится на части, в которых течение подчинено разным граням или ребрам призмы текучести. Число таких частей определяется только в процессе расчетов. Если упругие модули материалов сопрягаемых деталей не зависят от температуры и только предел текучести изменяется с температурой, то в любой из пластических областей, независимо от соответствия ее определенной грани или ребру

призмы текучести, удастся получить конечные аналитические зависимости температурных напряжений от уровня и распределения температуры. При переходе к следующему шагу расчетов следует алгоритмически предусмотреть определение возможностей и мест зарождения новых областей течения и исчезновения существующих, включая областей повторного (обратного) пластического течения. С эволюцией областей пластического течения можно ознакомиться в прежних наших работах [1, 2].

При отказе от одномерности осесимметричной задачи теории алгоритмически проследить за моментом и местами возникновения (исчезновения) новых областей течения, за продвижением упругопластических границ практически невозможно. Поэтому при организации приближенных численных расчетов процесса протекания операции горячей посадки использовалось гладкое условие текучести максимальных октаэдрических напряжений (условие Мизеса). В этом случае деление пластической области не возникает. В расчетах следующей в этом случае осесимметричной упругопластической или упруговязкопластической задачи теории неустановившихся температурных напряжений имеется иная проблема. Она диктуется сингулярности в постановке граничных условий. В задаваемых значениях напряжений на граничных поверхностях необходимо присутствуют разрывы, вызванные условиями контакта деталей сборки.

В [3] рассмотрен простейший пример сборки составной трубы из одинаковых составляющих одинаковой длины. При игнорировании очевидной сингулярности в краевых условиях расчеты приводят к ошибочному решению. Подобные ошибочные решения достаточно широко представлены в современных публикациях, когда соответствующие расчеты проводились с помощью популярных коммерческих пользовательских пакетов программ (ANSIS), либо авторских программных продуктах, основанных на методе конечных элементов. В сообщении предполагается привести ряд решений вместе с приемами сглаживания разрывов в граничных условиях и показать не только количественное, но и качественное отличие в результатах расчетов вносимое игнорированием наличия постановочных сингулярностей в заданиях краевых условий.

Литература

- [1] Буренин А.А., Ткачева А.В. О сборке двухслойной металлической трубы способом горячей посадки // Известие РАН. МТТ. 2019. № 8. С. 86-99.
- [2] Буренин А.А., Ткачева А.В. Эволюция температурных напряжений в задаче Гадолина о сборке двухслойной упругопластической трубы // Вестник ПНИПУ. Сер. механика. 2020. №3. С. 20-31.
- [3] Буренин А.А., Ткачева А.В. Задача Гадолина о процессе сборки двухслойной предварительно напряженной трубы // ПМТФ. 2023. Т. 64. №5. С. 225-240.



МОДЕЛЬ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУЛЬФИДНО-ОКСИДНОЙ КОРРОЗИИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ С УЧЕТОМ НАПРЯЖЕНИЙ

Дудин Д.С., Келлер И.Э.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
dmitryovj@yandex.ru, kie@icmm.ru

Жаропрочные никелевые сплавы применяются при изготовлении дисков и лопаток турбины высокого давления авиационных и морских газотурбинных двигателей, которые подвергаются воздействию солей из атмосферы и продуктов сгорания топлива. При температурах эксплуатации этих деталей последние испытывают высокотемпературную сульфидно-оксидную коррозию, приводящую к формированию дефектов на поверхности и истощению легирующими элементами поверхностного слоя, что приводит к их преждевременному разрушению. Исследования, в основном, ограничиваются построением по данным экспериментов зависимостей скорости роста коррозионного слоя и качественным выводам на их основе [1-4]. Более глубокие связи и предсказательные возможности способна выявить математическая модель, учитывающая взаимную диффузию (транспорт) компонентов в деформируемой среде с учётом химических реакций и микроструктурных изменений.

На основе анализа существующих работ и химических расчетов выписаны основные реакции сульфидно-оксидной коррозии жаропрочной стали, в котором рассматривается четыре химических реакции: окисление железа, хрома и сульфида хрома, сульфидирование хрома. На первом этапе молекулярный кислород проникает в металл и реагирует с ионами железа и хрома, движущимися навстречу кислороду. После достижения критической толщины коррозионного слоя молекулярная сера проникает в повреждённый поверхностный слой и доходит до границы металл-оксид, где начинает реагировать с хромом и проникать вглубь металла, стимулируя взаимную диффузию и развитие сульфидного слоя. Продолжающееся наращивание оксидных слоёв вместе с окислением сульфида хрома освобождает серу для дальнейшего проникновения вглубь металла, из-за чего присутствие серы в оксидных слоях не наблюдается. Рассматриваются четыре химических реакции, в которых фигурируют диффундирующие реагенты Fe , Cr , O_2 , S_2 и неподвижные продукты Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , Cr_2S_3 .

Описанный механизм учтен в формулировке связанной модели процессов взаимной диффузии и химических реакций в упруго деформируемой среде. Она позволяет описывать формирование слоистой структуры корродирующего поверхностного слоя, наблюдаемой экспериментально. Для описания транспорта компонент металлического сплава к коррозионной зоне разработан комбинированный подход к разложению диффузионного и деформационного движения, сочетающий использование маркерной диффузионной системы отсчёта и материальной конвективной скорости для описания связанных процессов взаимной диффузии и упруговязкого деформирования, обладающий определенными преимуществами [5]. На основе термодинамики сплошной среды получена система балансовых уравнений механики и вещества, определяющих уравнений и граничных условий. Численно исследуется одномерная задача для полупространства, демонстрирующая рост коррозионного слоя и обеднение хромом приповерхностного слоя материала с течением времени в атмосфере серы и кислорода. Модель может описывать обеднение легирующими элементами поверхности двухкомпонентного сплава железа и хрома, а также образование



оксидных и сульфидных слоев и формирование остаточных напряжений, а ее результаты могут быть сопоставлены с экспериментами.

Исследование выполнено за счет крупного научного проекта Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

Литература

- [1] Lee W. H., Lin R. Y. Oxidation, sulfidation and hot corrosion of intermetallic compound Fe₃Al at 605°C and 800°C // *Mat. Chem. Phys.* – 1999. – Т. 58. – С. 231–242.
- [2] Sun H., Liu J. Hot corrosion of Fe-Cr-Ni multi-principal element alloys in Na₂SO₄+25%NaCl mixture salts at 700–900°C // *Intermetallics.* – 2024. – Т. 166. – С. 108203.
- [3] Effects of imposed stresses on high temperature corrosion behaviour of T91 / Z. Ning et al // *Corros. Sci.* – 2021. – Т. 189. – С. 109595.
- [4] Высокотемпературная газовая коррозия никелевого сплава / В. З. Пойлов [и др.] // *Материаловедение.* – 2021. – Т. 3. – С. 42–46.
- [5] Дудин Д. С., Келлер И. Э. Обзор подходов к формулировке связанных уравнений взаимной диффузии в вязкоупругом теле // *Хим. физ. мезоскопия.* – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 296–311.

ДИАПАЗОН РАЗМЕРОВ И ШАГА СТРИНГЕРОВ, ТОЛЩИН МОНОСЛОЁВ И СХЕМ УКЛАДКИ ПАКЕТОВ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОМПОЗИТНЫХ ПАНЕЛЕЙ НЕСУЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА ОСНОВЕ УТОЧНЁННОЙ ТЕОРИИ УСТОЙЧИВОСТИ

Гавва Л.М.¹, Корольский В.В.¹, Фирсанов В.В.¹

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва

nio1asp@mail.ru, rva101@mail.ru

Усиленное внедрение математического моделирования и автоматизированных процессов на этапах проектирования конструкций является перспективой развития при использовании композиционных материалов в авиационной технике. Работа выполнена с целью поиска диапазона оптимальных шага, высоты стенки, ширины полки стрингеров, толщин монослоёв и схем укладки пакетов при размерно-весовом проектировании композитных панелей несущих поверхностей летательных аппаратов (ЛА) с ограничениями на основе уточнённой теории потери устойчивости.

В публикации [1] разработан подход к оптимальному проектированию и сформулировано аналитическое решение задачи оптимального проектирования конструктивно-анизотропных панелей ЛА минимальной массы из полимерных композиционных материалов. Оптимальный размерно-весовой проект базируется на условии ограничения величины наименьшего критического усилия действующей внешней сжимающей нагрузкой. Сопоставляются уровни критических сил общей изгибающей и многоволновой крутильной форм потери устойчивости. Запас по устойчивости полагается равным единице. Задача оптимального проектирования сводится к исследованию целевой функции веса панели как функции одной или нескольких переменных на условный экстремум в строгой математической постановке с использованием аналитических подходов в сочетании с численным методом нелинейного программирования.

Рассматриваются сложное напряжённо-деформированное состояние и задачи потери устойчивости плоской прямоугольной многослойной панели из композиционных материалов с эксцентричным набором продольных ребер жесткости. Панель находится под действием распределенной постоянной сжимающей нагрузки, приложенной к кромкам в плоскости обшивки в продольном направлении. Краевые условия на контуре соответствуют частному случаю граничных условий для плоской задачи и задачи изгиба.

Представлены соотношения новой математической модели для исследования потери устойчивости конструктивно-анизотропных композитных панелей. Научную новизну определяет дальнейшее развитие теории тонкостенных упругих стержней, связанное с проблемой контакта обшивки и стрингера с учётом деформации сдвига ребра при закручивании.

Линеаризованная проблема потери устойчивости панели сводится к решению краевых задач для дифференциального уравнения в частных производных восьмого порядка в прямоугольной области, так как изгиб и плоское напряженное состояние связаны. В качестве расчетной модели предлагается конструктивно-анизотропная схема панели с осреднением жесткостных характеристик набора по обшивке, когда определяются критические силы общей изгибающей формы потери устойчивости. Для исследования многоволнового крутильного выпучивания панели использован аппарат обобщенных функций с целью



дискретного ввода жесткостей стрингеров. Решение дифференциального уравнения деформированной поверхности восьмого порядка с чётными производными по каждой из координат для ортотропной структуры строится в двойных тригонометрических рядах в замкнутом виде.

Разработан пакет прикладных MATLAB-программ и реализован процесс оптимального проектирования панелей несущих поверхностей ЛА из полимерных композиционных материалов, находящихся в условиях механического воздействия, приводящего к потере устойчивости. Представлены результаты численной реализации методом градиентного спуска оптимального размерно-веса проекта для плоских прямоугольных стрингерных панелей из углепластика с несимметричными структурами по толщине многослойных пакетов обшивки и полки стрингера. Демонстрируется MATLAB-программа, которая выступает в качестве составной части комплекса программных сервисов для разработки, апробации и использования новых методов в области оптимального весового проектирования и контроля массы летательных аппаратов. Программа предназначена для оптимального проектирования конструктивно анизотропных панелей несущих поверхностей ЛА из композиционных материалов с ограничениями по устойчивости на основе уточнённой теории. Программа выполняет контроль рассчитанных оптимальных геометрических параметров на заданные ограничения.

Программа позволяет с высоким быстродействием рассчитывать оптимальные толщины слоёв в пакетах, оптимальные расстояния между рёбрами жёсткости, высоту стенки и ширину полки стрингера и, соответственно, оптимальное число стрингеров, оптимальное значение целевой весовой функции, величины критических усилий общей изгибной формы потери устойчивости и многоволнового крутильного выпучивания панели на основе уточнённой теории как ограничений при проектировании, параметры волнообразования изгибной и крутильной форм потери устойчивости панели. Условие равноустойчивости, когда общая изгибная и многоволновая крутильная формы потери устойчивости имеют одинаковую вероятность проявления, характерно для панелей с наличием слоёв в пакетах с углом укладки 45^0 . Оптимальное проектирование элементов планера самолета с ограничениями, построенными в рамках уточнённой теории, является базисом для снижения массовых характеристик авиационной техники на основе представленных результатов многоуровневой оптимизации размерно-весовых проектов.

Литература

[1] Korolskii V.V., Turbin N.V., Gavva L.M. Manipulation of optimal size-weight project parameters of composite structurally anisotropic aircraft panels with restrictions according to the refined buckling theory // Aerospace Systems. - 2024. – Vol. 7 (1). - <https://doi.org/10.1007/s42401-024-00277-2>.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КРЫЛА СВЕРХЗВУКОВОГО ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА

Федоренко А.Н.^{1,2}, Юргенсон С.А.¹, Федулов Б.Н.¹, Ломакин Е.В.¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

²Сколковский институт науки и технологий, Москва
a.fedorenko@skoltech.ru

Сокращение продолжительности дальних перелетов является перспективным направлением для развития гражданской авиации. В 1970-х годах существовали два известных проекта сверхзвуковых пассажирских самолетов: Ту-144 и Конкорд. Эти самолеты летали по регулярным маршрутам, но высокие требования к безопасности и неэффективность в потреблении топлива в конечном итоге привели к их снятию с эксплуатации. Проектирование и оптимизация сверхзвуковых самолетов является сложной многокритериальной задачей, требующей анализа аэроупругости, принятия во внимание как дозвуковых, так и сверхзвуковых режимов полета, а также соблюдения ограничений по шуму.

В условиях многокритериальности задачи оптимизации, аэродинамические критерии ведут к уменьшению строительной высоты крыла. С другой стороны, уменьшение строительной высоты требует повышения характеристик материалов, либо же применения нестандартных конструктивных решений. В данной работе рассмотрены варианты крыла сверхзвукового пассажирского самолета, и проведена их оптимизация по условиям прочности. Рассматривались две конструктивные схемы: традиционная конструкция с продольным и поперечным силовым набором, и вариант на основе решетчатых конструкций (рисунок 1).

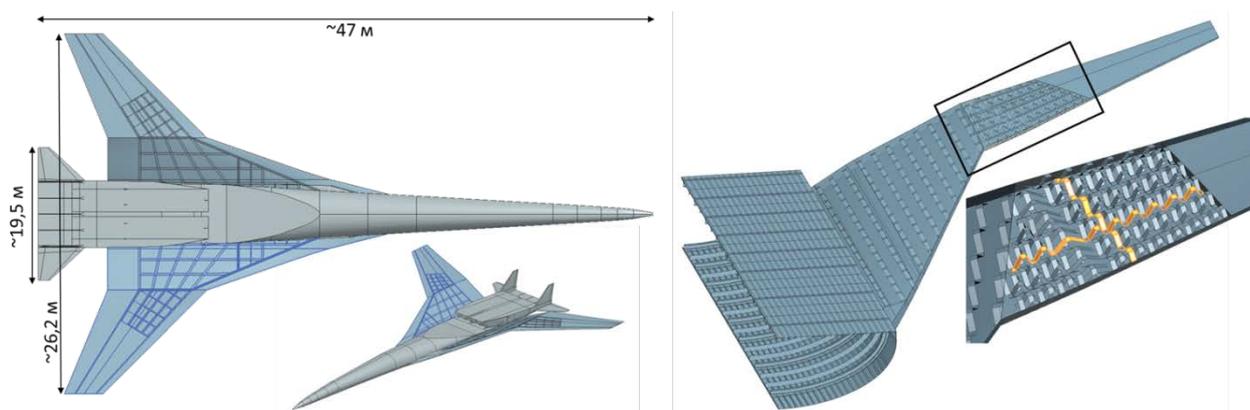


Рисунок 1. Общий вид сверхзвукового самолета с крылом традиционной схемы и крыло с решетчатыми структурами.

Постановка задачи оптимального распределения толщины оболочек представлена в форме, адаптированной для решения методом конечных элементов. В данной работе

рассматривается задача минимизации податливости с соблюдением ограничений на эквивалентные напряжения, объем и минимальную толщину (1, а – 1, д):

$$\min_{t(x)} \mathbf{F}^T \mathbf{u} \quad (1, а)$$

при условиях:

$$\mathbf{K}[t(x)]\mathbf{u} = \mathbf{F}, \quad (1, б)$$

$$V = \int_{\Omega} t(x) dA \leq V_{max}, \quad (1, в)$$

$$\sigma_{eq}(x) \leq \sigma_0 \quad \forall x \in \Omega, \quad (1, г)$$

$$t(x) \geq t_{min}, \quad (1, д)$$

где $t(x)$ – функция, определяющая толщину оболочки в точке x оптимизируемой области Ω . \mathbf{K} – глобальная матрица жесткости, \mathbf{u} – вектор узловых перемещений, \mathbf{F} – вектор узловых сил. Область Ω задается серединными поверхностями геометрии. Величина V_{max} задает ограничение на общий объем, который определяется толщиной $t(x)$ и площадью Ω . Эквивалентные напряжения $\sigma_{eq}(x)$ ограничены предельным значением σ_0 . Дополнительные ограничения связаны с условием постоянства $t(x)$ в каждой подобласти Ω_i , на которые разделено Ω :

$$\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \dots \cup \Omega_n, t(x) = t_i \text{ для } \forall x \in \Omega_i, i = 1, \dots, n, \quad (1, е)$$

что означает постоянство t_i внутри непересекающихся подобластей Ω_i . Разбиение на Ω_i позволяет снизить число проектных переменных $t_i(\Omega_i)$, и это позволяет использовать градиентные методы оптимизации [1]. А с точки зрения производства это позволяет получить более простую конструкцию для изготовления. Результаты оптимизации толщин внутренних элементов двух вариантов крыла приведены на рисунке 2.

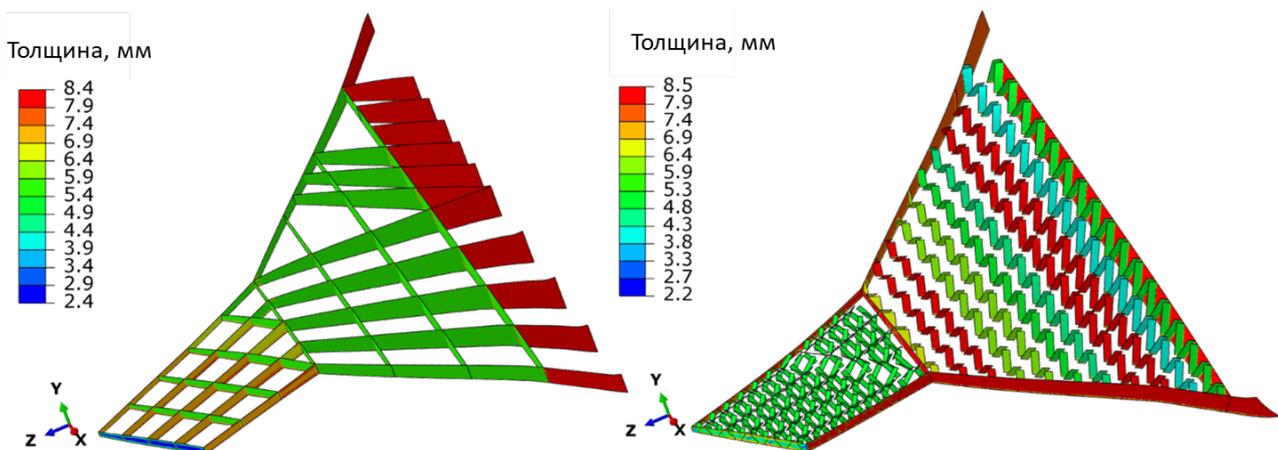


Рисунок 2. Результаты оптимизации двух вариантов крыла.



В работе показано, что предложенная конструкция крыла на основе решетчатых структур удовлетворяет критерию прочности по максимальным напряжениям, обеспечивая при этом большую жесткость по сравнению с крылом традиционной компоновки с уменьшением прогиба примерно на 10%.

Литература

[1] Liang K., Yin Z. Investigation on nonlinear buckling performance of the optimized wing structure under the realistic flight cases //Aerospace Science and Technology. – 2023. – Т. 139. – С. 108416.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ СЕТЧАТЫХ ПАНЕЛЕЙ ПРО-БИОНИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ КРЫЛА СПС

Левченков М.Д.

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский
mihalevch@mail.ru

Одной из задач проекта НЦМУ «Сверхзвук» является разработка перспективных про-бионических КСС и конструкций на их основе для планера перспективного сверхзвукового пассажирского самолета (СПС), а также разработка методов их оптимизации. Про-бионическая конструкция планера СПС включает:

- сетчатую композитную конструкцию отсеков носовой части фюзеляжа на основе жесткого сетчатого каркаса и эластичных обшивок с ударозащитными элементами,
- металло-композитную конструкцию крыла на основе гофрированных/сетчатых панелей и гофрированных стенок лонжеронов с однонаправленными композитными поясами.

Данная работа посвящена разработке методики моделирования и оптимизации конструкции сетчатых панелей для про-бионической конструкции крыла перспективного СПС.

Моделирование сетчатых панелей крыла осуществлялось в рамках многоуровневого алгоритма анализа прочности, разработанного в ЦАГИ [1] для анализа прочности и проведения проектировочных исследований конструкций планера гражданских самолётов с нетрадиционными компоновочными схемами и КСС.

Для анализа прочности сетчатых панелей многоуровневого алгоритма разработана автоматизированная параметрическая прочностная конечно-элементная модель (КЭМ), которая строится на основе оболочечных элементов, моделирующих обшивку, и балочных элементов, моделирующих ребра сетчатого каркаса. Данная модель позволяет получить запасы по прочности, местной и общей устойчивости, а также приведенные жесткостные характеристики. Для поиска рациональных значений параметров сетчатых панелей в рамках многоуровневого алгоритма разработан градиентный алгоритм оптимизации. Алгоритм позволяет найти рациональные значения таких параметров панелей, как толщина обшивки, высота ребер, ширина продольных, поперечных и наклонных ребер.

В работе проведены сравнительные проектировочные расчеты конструкции корневой части крыла перспективного гипотетического СПС с традиционной КСС и про-бионической КСС. Результаты расчетов показали, что про-бионическая конструкция крыла имеет на 8-10 % меньший вес, чем традиционная металлическая конструкция.

Доклад подготовлен в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020—2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 17 мая 2022 г. № 075-15-2022-1023).

Литература

[1] A. Shanygin, V. Fomin, G. Zamula Multilevel approach for strength and weight analyses of composite airframe structures // 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences 2010, ICAS 2010, 19-24.09.2010.

ТРЕХМЕРНОЕ АРМИРОВАНИЕ СЛОИСТЫХ ТКАНЕВЫХ КОМПОЗИТОВ С ПОМОЩЬЮ ФЕЛТИНГА

Форенталь Г.А.¹, Сапожников С.Б.^{1,2}

¹Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

²Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е.Жуковского,
г. Жуковский, Московская область
gforental@mail.ru, sapozhnikovsb@susu.ru

Для трехмерного армирования пакета сухих тканевых преформ использована технология фелтинга – пробивка пакета трехгранной иглой с зазубринами [1, 2]. Зазубрины частично повреждают нити и вытягивают их в направлении нормали к поверхности. Целью работы было изучение влияния фелтинга (10 ударов иглой на 1 см²) на трансверсально-сдвиговую прочность слоистого стеклопластика с эпоксидной матрицей с помощью экспериментов на балках по схемам DCB и ENF.

Исследования, проведенные на стеклоткани полотняного переплетения, показали, что количество вытянутых при фелтинге в направлении нормали волокон увеличивается при увеличении плотности ударов по линейной зависимости. Это позволяет считать процессы удара иглой по ткани независимыми. При этом длина вытянутых волокон больше критической.

Экспериментальные исследования, проведенные на стеклоткани полотняного переплетения с фелтингом, показали повышение критической энергии развития трещин отрыва G_{Ic} и сдвига G_{IIc} на 40% и 33% соответственно по сравнению с образцами без фелтинга.

Оценка нагрузок разрушения образцов с трещиноподобными дефектами проведена с помощью нелокального подхода, использующего осредненные на некоторой базе λ напряжения [3, 4] в предположении линейной упругости материала вплоть до разрушения. Расчеты проведены с использованием МКЭ (пакет ANSYS Workbench). При создании сетки конечных элементов задавали параметр $\lambda_x=0,75$ мм по ширине образца и параметр $\lambda_z=0,2$ мм по толщине образца, что соответствует толщине слоя.

При проведении расчетов не использовали контактные алгоритмы, только рассматривали разрушение слоя композита, ближайшего к трещине, и происходящее при этом изменение площади склейки слоёв. Трещину рассматривали как концентратор напряжений. Трехпараметрический критерий прочности композита, записанный через осредненные на базе λ напряжения, позволяет использовать метод пошагового продвижения трещины для прогнозирования кривой «нагрузка–перемещение»:

$$\left(\frac{\max \sigma_{x\lambda}}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\max \sigma_{z\lambda}}{Z_t}\right)^2 + \left(\frac{\max \tau_{xz\lambda}}{S}\right)^2 - \frac{\max \sigma_{x\lambda} \cdot \max \sigma_{z\lambda}}{X_t \cdot Z_t} \leq 1.$$

Пределы прочности по направлениям X и Z (X_t и Z_t) и сдвиговую прочность в плоскости XZ (S) находили с помощью обратного метода. Эти характеристики варьировали и отыскивали их наилучшее сочетание минимизируя среднеквадратическое отклонение расчетных и экспериментальных перемещений при заданных нагрузках. Для образцов DCB и ENF без фелтинга определены значения $X_t=360$ МПа, $Z_t=39$ МПа и $S=77$ МПа. Для образцов с фелтингом – $X_t^*=270$ МПа, $Z_t^*=46$ МПа и $S^*=89$ МПа.

Фелтинг с плотностью 10 ударов на 1 см^2 увеличивает предел прочности на растяжение композита в направлении Z на $\sim 18\%$, а предел прочности на сдвиг в плоскости XZ на $\sim 16\%$.

Увеличение плотности фелтинга может существенно увеличить трансверсальную прочность композита, но при этом происходит снижение предела прочности в плоскости укладки слоев. Увеличение плотности фелтинга до 70 ударов на 1 см^2 приводит к снижению прочностных характеристик слоистого тканевого композита в плоскости XY на 30% [5]. Выбор наиболее рациональной плотности фелтинга должен производиться при решении конкретной задачи.

Технологию фелтинга можно использовать для уменьшения площади расслоения после локальных ударов. При этом важным преимуществом данной технологии является то, что она позволяет создавать области с произвольной плотностью фелтинга и обеспечивает повышение трещиностойкости только в необходимых местах конструкции.

Материал подготовлен при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение от 17 мая 2022 г. № 075-15-2022-1023).

Литература

- [1] Chen X., Zhao Y., Zhang C., Wang X., Chen L. Robot needle-punching for manufacturing composite performs – Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018. – Vol. 50. – С. 132-139.
- [2] Форенталь Г.А., Сапожников С.Б. Перспективы технологии фелтинга для локального трёхмерного армирования полимерных тканевых композитов – Композиты и наноструктуры, 2022. – Т. 14, №4 (56). – С. 233–245.
- [3] Nguyen H.T., Dönmez A.A., Bažant Z.P. Structural strength scaling law for fracture of plastic-hardening metals and testing of fracture properties – Extreme Mechanics Letters, 2021. – Vol. 43. – 101141.
- [4] Maimí P., González E. V., Gascons N., Ripoll L. Size effect law and critical distance theories to predict the nominal strength of quasibrittle structures. – Applied mechanics reviews, 2013. – 65(2). – 020803.
- [5] Forental G.A., Kheruvimov A.V., Nikonov A.V., Sapozhnikov S.B. Stack fabric felting to get PCM GIIc improvement and LVI tolerance – IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2021. – Vol. 1024. – 1024 (1) 012001.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НАГРУЗКИ

Каменских А.О.¹, Лекомцев С.В.¹, Матвеев В.П.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
kamenskikh.a@icmm.ru

Тонкостенные элементы конструкций широко используются во многих отраслях промышленности. Из них изготавливаются фюзеляжи авиакосмических аппаратов, нефте- и газохранилища, корпуса разнообразных приборов. Они обеспечивают низкую массу изделия при соблюдении необходимых требований к прочности. Существенным недостатком тонких пластин и оболочек является их склонность к потере устойчивости и усталостному разрушению в результате возникновения колебаний большой амплитуды в условиях резонанса. Тонкостенные конструкции часто эксплуатируются в широком диапазоне температур (самолёты, космические корабли, нефтехранилища на крайнем севере), что приводит к температурной нагрузке, оказывающей значительное влияние на их динамические характеристики.

В данной работе проанализировано влияние температурной нагрузки на собственные частоты колебаний пологих оболочек. Вариационное уравнение спектральной задачи о свободных колебаниях упругого тела с учётом предварительного напряжённо-деформированного состояния выглядит следующим образом:

$$\int_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} dV - \omega^2 \int_V \delta \mathbf{u}^T \rho \mathbf{u} dV + \int_V \delta \mathbf{s}^T \boldsymbol{\sigma}_0 \mathbf{s} dV + \int_V (\delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{C} \mathbf{S}_0 \mathbf{s} + \delta \mathbf{s}^T \mathbf{S}_0^T \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} + \delta \mathbf{s}^T \mathbf{S}_0^T \mathbf{C} \mathbf{S}_0 \mathbf{s}) dV = 0. \quad (1)$$

Здесь $\boldsymbol{\varepsilon}$ — вектор, содержащий компоненты линейной части тензора конечных деформаций; \mathbf{C} — матрица упругости; ω — собственная частота колебаний; $\mathbf{u} = \{u, v, w\}^T$ — вектор неизвестных перемещений, где u, v, w — компоненты перемещений; ρ — плотность; \mathbf{s} — вектор компонент деформаций; $\boldsymbol{\sigma}_0$ — матрица предварительных напряжений; \mathbf{S}_0 — матрица линейных множителей, учитывающая предварительные деформации.

Компоненты матриц $\boldsymbol{\sigma}_0$ и \mathbf{S}_0 находятся из решения нелинейной статической задачи о температурном нагружении упругого тела:

$$\int_V (\delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} - \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{C} \alpha \Delta T) dV = 0, \quad (2)$$

где α — коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР); ΔT — разница температур.

Решение задачи осуществляется в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL. Оболочка дискретизируется 20-узловыми конечными элементами с квадратичной аппроксимацией перемещений (solid186). Учёт больших деформаций позволяет анализировать поведение конструкции после потери устойчивости. При исследовании закритического состояния начальные несовершенства оболочки учитываются путём вероятностного распределения механических свойств в каждом конечном элементе. Эти отклонения лежат в диапазоне $\pm 5\%$ от номинального значения для модуля упругости,

коэффициента Пуассона, КЛТР и плотности. Адекватность используемой конечно-элементной модели подтверждена сравнением с результатами работы [1], в которой рассмотрена задача о колебаниях защемлённой пластины под действием температурной нагрузки.

В настоящей работе исследованы колебания полой оболочки с различной кривизной (H/h). Рассмотрены несколько вариантов граничных условий: CCCC, CFCF и FCFC. Здесь буквами обозначен вид закрепления каждой стороны: F — свободный край, C — жёсткое закрепление. Полученные зависимости максимального нормального прогиба (w_{\max}) и низшей собственной частоты колебаний (ω_1) полой оболочки с граничным условием CCCC от температурной нагрузки приведены на Рисунке 1.

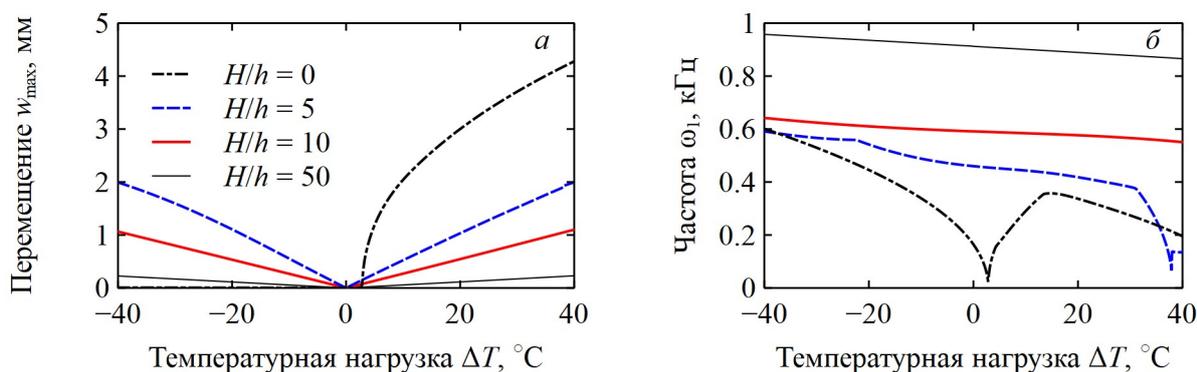


Рисунок 1 — Зависимость максимального нормального перемещения (а) и низшей собственной частоты колебаний (б) жёстко закреплённой по всем сторонам полой оболочки от температурной нагрузки

Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы. Пластина ($H/h = 0$) обладает большей чувствительностью к температурной нагрузке по сравнению с пологими оболочками. Низшая собственная частота колебаний пластины после потери устойчивости начинает повышаться, что связано с её упрочнением в результате выпучивания. С увеличением отношения H/h влияние температуры становится слабее. С ростом кривизны конструкции её жёсткость возрастает, что приводит к повышению низшей собственной частоты колебаний и менее резкому изменению частоты при изменении температурной нагрузки.

Работа выполнена в рамках реализации Программы создания и развития научных центров мирового уровня на 2020–2025 гг. при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (Соглашение от 21 апреля 2022 года №075-15-2022-329).

Литература

[1] Azzara R., Carrera E., Filippi M., Pagani A. Vibration analysis of thermally loaded isotropic and composite beam and plate structures // Journal of Thermal Stresses. – 2023. – Vol. 46, No. 5. – P. 369–386.

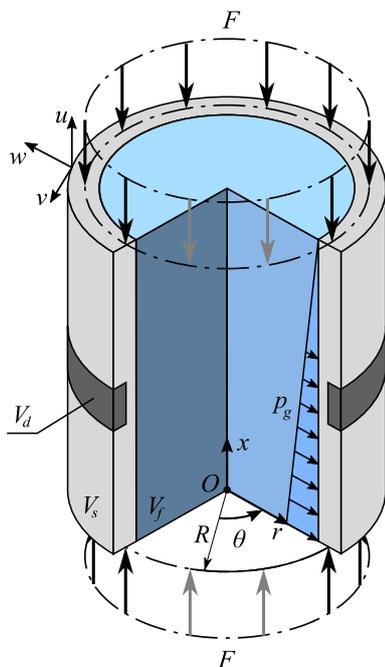
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДЕФЕКТНОЙ НАГРУЖЕННОЙ ОБОЛОЧКИ С ЖИДКОСТЬЮ

Бочкарёв С.А., Сенин А.Н.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

bochkarev@icmm.ru, senin.a@icmm.ru

Различные машиностроительные конструкции в процессе промышленной эксплуатации могут подвергаться воздействию агрессивной среды [1]. При поверхностном контакте с некоторым жидким или газообразным окружением, имеющим природное либо технологическое происхождение, в результате физико-химических или электрохимических реакций осуществляется процесс постепенного изменения микроструктуры и химического состава материала. При длительном взаимодействии происходит необратимая деградация как физико-механических свойств, так и геометрических параметров элементов конструкции. В результате такие ответственные сооружения, как резервуары, содержащие жидкость или погруженные в неё; трубопроводы, транспортирующие жидкую или газообразную среду; и т.п. под действием рабочих нагрузок теряют несущую способность, что может приводить к их преждевременному разрушению. В связи с этим практический интерес представляет изучение влияния внешних сил, которые с одной стороны наряду с агрессивной средой способствуют протеканию коррозионных процессов [2], а с другой — усугубляют состояние поврежденных конструкций.



Рассматриваются цилиндрические оболочки, нагруженные сжимающим осевым усилием F . Их внутренняя полость полностью или частично заполнена идеальной сжимаемой жидкостью. Принято во внимание изменение в напряжённом состоянии смоченной поверхности, обусловленное воздействием инициированных гравитацией гидростатических сил p_g . На внутренней или внешней поверхности оболочки учтено наличие дефектной области V_d , имеющей форму кольца прямоугольного сечения и обладающей собственным набором физико-механических параметров. Необходимо проанализировать влияние её параметров на динамические характеристики упругого тела при различных уровнях заполнения жидкостью и разных комбинациях граничных условий.

Динамика идеальной сжимаемой среды описывается в рамках потенциальной теории. Соответствующее дифференциальное уравнение второго порядка для потенциала скорости совместно с условием непроницаемости, а также граничными условиями преобразуется к слабой форме с помощью метода Бубнова — Галёркина [3]. Для вычисления гидродинамического давления используется линеаризованная формула Бернулли. Вариационное уравнение движения тонкостенного тела формулируется с помощью соотношений нелинейной теории тонких оболочек, основанных на гипотезах Кирхгофа — Лява. Численное решение задачи осуществляется с помощью полуаналитического варианта

метода конечных элементов (МКЭ), согласно которому искомые неизвестные раскладываются в ряд Фурье по окружной координате. Посредством стандартных процедур МКЭ получена связанная система уравнений, описывающая гидроупругое взаимодействие нагруженного тонкостенного тела с жидкой средой [4]. Величины, характеризующие начальное напряжённое, но недеформированное состояние, определяются из решения осесимметричной статической задачи. Оценка устойчивости базируется на анализе характеристических показателей, получаемых при последовательно возрастающем значении внешней нагрузки. Достоверность получаемых результатов оценена на ряде задач. В частности, осуществлено сравнение собственных частот колебаний с решением, в котором тонкостенное тело и дефект рассматриваются в рамках линейной теории упругости [5].

На примере тонкостенной цилиндрической оболочки кругового сечения детально оценено влияние различных геометрических параметров изъяна (положение, ширина, глубина) на границы устойчивости. В результате проведённых исследований установлено, что наличие повреждённой области, происхождение которой может быть, в том числе, связано с коррозионным воздействием, приводит к уменьшению критических усилий. Степень этого снижения определяется геометрическими размерами области неоднородности, её положением в осевом направлении и поверхностью расположения. В сравнении с внутренней поверхностью расположение области изъяна на внешней поверхности приводит к более сильному ухудшению динамических свойств конструкции. На основании выполненных расчётов можно заключить, что защита промышленных конструкций от внешних воздействий должна быть также обязательна, как и от содержимого, с которым они контактируют.

Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124020700047-3.

Литература

- [1] Groysman A. Corrosion for Everybody. Dordrecht: Springer, 2010. – 377 с.
- [2] Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. М.: Металлургия, 1981. – 270 с.
- [3] Бочкарёв С.А., Матвеев В.П. Численное моделирование устойчивости нагруженных оболочек вращения при внутреннем течении жидкости // ПМТФ. – 2008. – Т. 49, № 2. – С. 185-195.
- [4] Bochkarev S.A., Lekomtsev S.V., Senin A.N. Natural vibrations and stability of loaded cylindrical shells partially filled with fluid, taking into account gravitational effects // Thin-Walled Structures. – 2021. – Т. 164. – 107867.
- [5] Бочкарёв С.А., Лekomцев С.В., Сенин А.Н. Численное исследование влияния дефектов поверхности на устойчивость цилиндрической трубы с жидкостью // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2018. – Т. 22, No. 3. – С. 557–573.

ЧИСЛЕННОЕ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Баяндин Ю.В.¹, Наймарк О.Б.¹, Гареев А.Р.², Думанский С.А.³

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²АО «НИИГрафит», Москва

³МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

buv@icmm.ru

Детали из углеродных материалов в ракетно-космической технике подвергаются интенсивным тепловым воздействиям, которые предшествуют их горению, что приводит к инициированию волн напряжений (тепловому удару) с последующим их разрушением. Высокая скорость нагрева и сильная нелинейная зависимость температуропроводности от температуры, обусловленная пористостью углеродного материала [1], определяют возможность эффекта метастабильной локализации тепла в «режиме с обострением» [2]. Описание эволюции термомеханической системы описывается системой дифференциальных уравнений механики деформируемого твердого тела. Аналитические решения могут быть получены для сильно упрощенных постановок, поэтому на практике требуются численные решения, в том числе с учетом нелинейных теплофизических свойств материалов. Наиболее популярными численными методами в МДТТ являются метод конечных разностей и метод конечных элементов. В данной работе постановка была реализована в пакете прикладных программ конечно-элементного анализа Comsol Multiphysics.

Математическая постановка в нестационарной постановке для описания термоупругого поведения материала состоит из законов баланса массы, импульса, энергии, замыкающего уравнения в виде упругого закона с учетом теплового расширения/сжатия и имеет следующий вид

$$\dot{\rho} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v}, \quad (1)$$

$$\rho \dot{\mathbf{v}} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}, \quad (2)$$

$$\rho c \dot{T} = -\boldsymbol{\alpha} T : \dot{\boldsymbol{\sigma}} + \nabla \cdot \lambda \nabla T, \quad (3)$$

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T), \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^R = \mathbf{C} : (\mathbf{D} - \boldsymbol{\alpha} \dot{T}), \quad (5)$$

где ρ – массовая плотность; \mathbf{v} – вектор скорости; $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений, $\nabla(\cdot)$ – оператор градиента в текущей конфигурации; $\dot{(\cdot)}$ – материальная производная; \mathbf{D} – тензор деформации скорости, \mathbf{C} – тензор упругих свойств четвертого ранга; $\boldsymbol{\alpha}$ – коэффициент теплового расширения, λ – коэффициент теплопроводности; T – температура. Уравнения дополняются граничными и начальными условиями для плоского слоя (приближение плоского удара). На одной поверхности задается интенсивный тепловой поток \mathbf{q}_0 , на другой – изотермическое условие $T=T_0$. Задача решается методом конечных элементов в ослабленной формулировке (Weak Form).

Для валидации модели необходимо использовать сравнение численных результатов с аналитическим решением. Асимптотическое решение строится для нелинейного уравнения теплопроводности с использованием метода автомодельной редукции [3]. Для нелинейных параболических уравнений в отличие от линейной постановки отсутствует принцип суперпозиции решений, свойства нелинейной среды характеризуются возникающими пространственно-временными масштабами, не зависящими от внешних воздействий. Поэтому анализ каждого вида нелинейного уравнения требует отдельного внимания.

Квазилинейное параболическое уравнение теплопроводности для среды со степенной зависимостью коэффициента температуропроводности от температуры $k(u) = k_0 u^n$ записывается для энергии u в безразмерном виде

$$\partial u / \partial t = \partial(k_0 u^{-n} \partial u / \partial x) / \partial x, \quad (6)$$

$$u|_{t=0} = u_0, \quad (7)$$

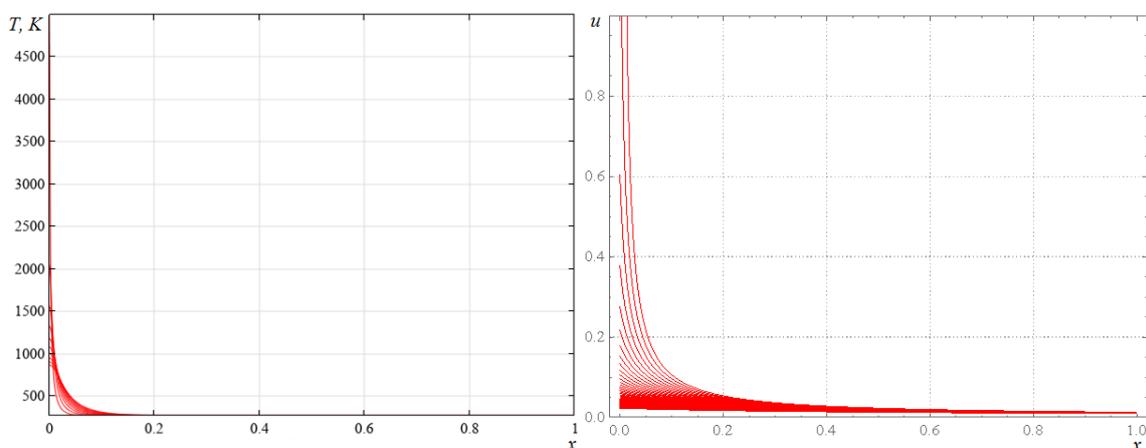
$$k(u) \partial u / \partial x|_{x=0} = q_0, \quad (8)$$

$$u|_{x=1} = u_0. \quad (9)$$

Решение строится в форме волны $u(x, t) = V(x - at)$. Полученное решение для $n=1$ выражаются отношением экспоненциальных функций, которое также может быть представлено гиперболическими функциями, а для $n=1/2$ имеет вид гиперболического тангенса в четвертой степени. Приведем характерный вид асимптотического решения для $n=1$

$$u = u_0 + C \frac{e^{\frac{(x-at)}{2}}}{ae^{\frac{(x-at)}{2}} - 1}. \quad (10)$$

Качественное сравнение численного и аналитического решений приведено на рисунке 1. Таким образом, предложенная модель интенсивного нагрева термоупругого материала реализована в пакете прикладных программ Comsol Multiphysics и получено хорошее соответствие численного и аналитического решений.



а)

б)

Рисунок 1—Структура обострения температуры на границе:
а) численное моделирование, б) аналитическое решение



Литература

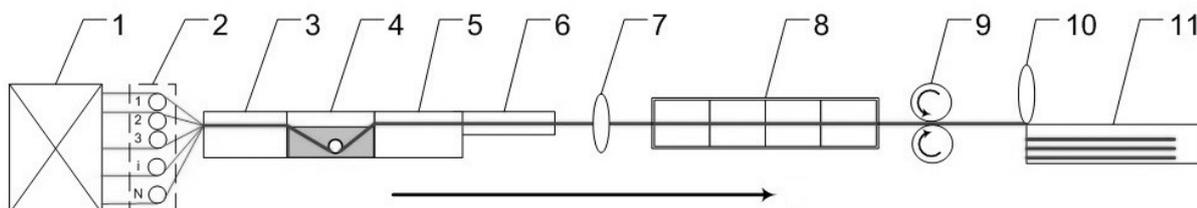
- [1] Чеблакова Е.Г., Бамборин М.Ю., Максимова Д.С., Гареев А.Р., Колесников С.А. Повышение огнеупорности углеродных композиционных материалов за счет ограничения гетерогенной поверхности окисления //Новые огнеупоры. 2016. №. 4. С. 13-23.
- [2] Беляев В. В., Наймарк О. Б. Кинетика многоочагового разрушения при ударно-волновом разрушении //Докл. АН СССР. 1990. Т. 312. №. 2. С. 289-293.
- [3] Самарский А.А., Галактионов В.А., Курдюмов С.П., Михайлов А.П. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. М.: Наука. 1987. 480 с.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТВЕРЖДЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ганзий Ю.В., Чекмышев К.Э.

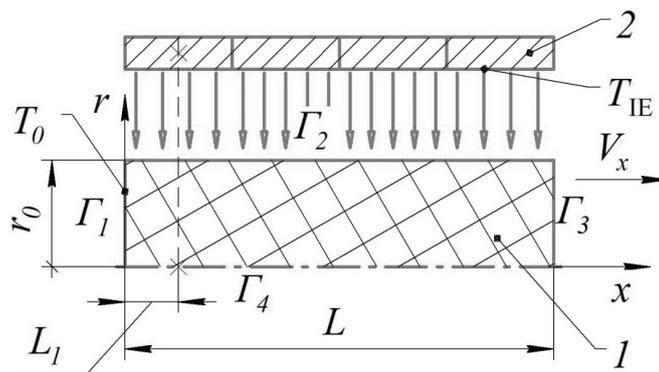
УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск
ganziy@udman.ru, chekk.90@udman.ru

Технологический процесс изготовления изделий из композитных полимерных материалов состоит из нескольких последовательных операций, одной из которых является операция горячего отверждения связующего вещества. На этой операции завершается процесс формообразования сплошного несущего силового стержня заготовки, и окончательно формируются физико-механические, электрические и эксплуатационные свойства изделия. Температурный режим в печи полимеризации устанавливается в зависимости от диаметра заготовки, скорости протяжки, длины печи, продолжительности процесса нагрева и состава полимерного связующего [1]. Заданный температурный режим с одной стороны должен обеспечить полное отверждение связующего вещества, а с другой отсутствие плавления и терморазрушения его составных частей. Число операций в таком технологическом процессе (рис.1) зависит от химического состава связующего вещества, а также от температуры отверждения эпоксидного отвердителя, которая непосредственно определяется типом отвердителя, его активностью и присутствием катализатора.



1 – магазин хранения ровинга; 2 – натяжители композитного волокна; 3 – электрическая печь предварительного нагрева; 4 – пропиточная ванна; 5 – электрическая печь для удаления летучих компонентов; 6 – формовочный узел; 7 – обмотчик; 8 – печь полимеризации; 9 – траковое тянущее устройство; 10 – дисковая пила; 11 – склад

На рис.2. представлена схема процесса, когда заготовка из композита цилиндрической формы находится на входе в печь полимеризации 8 (рис.1), в которой она равномерно нагревается относительно оси симметрии.



1 – заготовка из композита; 2 – секции инфракрасных излучателей

Рис. 2. Расчётная схема процесса нагрева заготовки из композита в печи полимеризации.

Математическая модель изменения температурного поля заготовки композитной арматуры при её нагреве в печи полимеризации описывается уравнением теплопроводности:

$$\bar{c}\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \bar{c}\rho V_x \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\bar{\lambda} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{\lambda} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q_w, \quad (1)$$

здесь \bar{c} – средняя удельная массовая теплоёмкость; $\bar{\rho}$ – средняя плотность; T – температура; t – время; V_x – продольная скорость движения заготовки в печи полимеризации; $\bar{\lambda}$ – средний коэффициент теплопроводности; Q_w – мощность внутренних источников тепловыделения, возникающая в процессе отверждения связующего вещества:

Решение дифференциального уравнения теплопроводности (1) численными методами сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Уравнение (1) решено методом конечных разностей по схеме расщепления по направлениям.

Разработанная математическая модель процесса нагрева заготовки композитной арматуры в печи с учётом кинетики отверждения связующего вещества и численный алгоритм её реализации могут использоваться для получения данных о температурном поле заготовки из композита и степени отверждения связующего вещества, которые необходимы для прогнозирования полноты, стабильности процесса отверждения и свойств.

Литература

[1] Чекмышев К. Э., Ганзий Ю. В., Макаров С. С. Математическое моделирование процесса нагрева заготовки композитной арматуры в печи с учётом кинетики отверждения связующего вещества// Химическая физика и мезоскопия. – Ижевск, 2022. – 188-203 с.

ПРЯМАЯ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ: ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА

Вяткин Я.В., Трусов П.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
viatkiniv@gmail.com, tpv@matmod.pstu.ac.ru

Для удовлетворения требований современной промышленности необходимо создавать продвинутое технологии изготовления деталей и изделий, получаемых путем термомеханической обработки металлов и сплавов методами интенсивной неупругой деформации. Известно, что эволюционирующая мезо- и микроструктура существенно влияет как на сам процесс изготовления, так и на итоговые эксплуатационные свойства готовых изделий. В связи с этим эффективным путем представляется использование многоуровневых моделей, основанных на широком классе физических теорий пластичности (ФТП) [1]. При изучении миниатюрных изделий возникает вопрос о влиянии т.н. «эффектов масштаба» [2] на их физико-механические свойства. В частности, актуальной задачей является анализ влияния свободной поверхности на физико-механические свойства моно- и поликристаллических изделий с использованием прямой модели упруговязкопластичности. Существует ряд исследований [3–6], которые свидетельствуют о разупрочняющем характере влияния свободной поверхности на приповерхностные зоны образцов. В связи с этим данная работа посвящена модификации закона упрочнения систем скольжения (СС) краевых дислокаций для учета падения критических касательных напряжений вблизи свободной поверхности.

Оценка падения критических касательных напряжений на СС («релаксация») осуществлена с применением анализа относительно простых ситуаций, описывающих взаимодействие дислокаций со свободной поверхностью кристаллитов (рисунок 1).

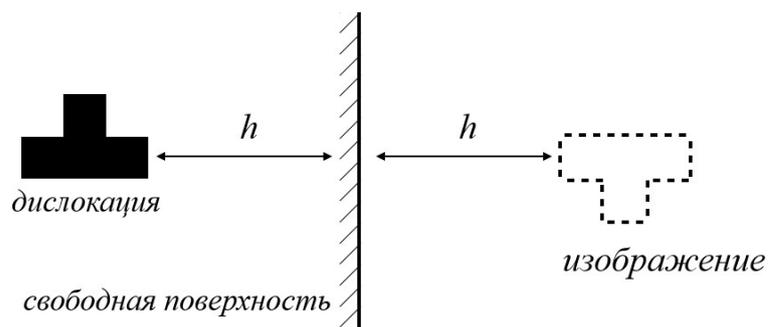


Рис. 1. Схема одиночной краевой дислокации вблизи свободной поверхности и ее «изображения».

Итоговое соотношение для максимальных напряжений релаксации выглядит следующим образом:

$$\tau_{\text{rel}}^{\text{max}}(h) = \frac{\zeta \mu b}{4\pi(1-\nu)} \frac{1}{h},$$

где h – расстояние до свободной поверхности, b – модуль вектора Бюргерса, μ – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона, ζ – безразмерный коэффициент для калибровки модели.

Для проверки адекватности модели был проведен ряд численных экспериментов над монокристаллическими образцами, имеющими в начальной конфигурации форму куба. Получены результаты решения начально-краевых задач в объемной постановке. На рисунке 2 приведено распределение средних критических касательных напряжений в начальный момент времени в плоскости срединного сечения образца.

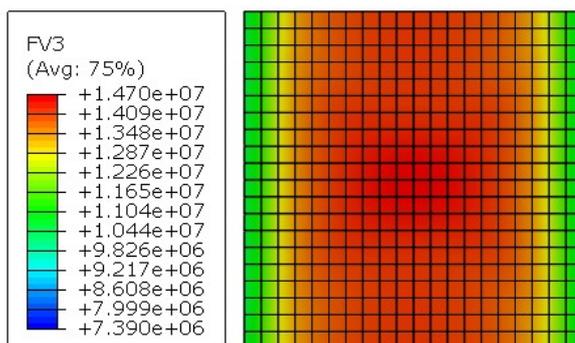


Рис. 2. Распределения среднего по СС критического касательного напряжения (Па) при значении накопленной деформации 0%

Параметры модели были выбраны характерные для монокристалла меди. Однотипные испытания проводились для нескольких видов образцов: с характерным линейным размером 20, 50, 100 и 150 мкм. Сравнение результатов при разных случаях показывает явное наличие эффекта масштаба, который проявляется в уменьшении среднего предела текучести для образцов с уменьшением их характерных размеров.

Литература

- [1] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2019. – 605 с.
- [2]. Arzt E. Size effects in materials due to microstructural and dimensional constrains: a comparative // Acta Materialia. 1998. Vol. 46, Is. 16. P. 5611–5626.
- [3] Keller C., Hug E., Habraken A.M., Duchene L. Finite element analysis of the free surface effects on the mechanical behavior of thin nickel polycrystals // International Journal of Plasticity. 2012. Vol. 29. P. 155–172.
- [4] Stölken J.S. and Evans A.G. A microbend test method for measuring the plasticity length scale // Acta Materialia. 1998. Vol. 46. Is. 14. P. 5109–5115.
- [5] Yang B., Motz C., Rester M., Dehm G. Yield stress influenced by the ratio of wire diameter to grain size – a competition between the effects of specimen microstructure and dimension in micro-sized polycrystalline copper wires // Philosophical Magazine. 2012. Vol. 92, Is. 25–27. P. 3243–3256.
- [6] Jang D. and Greer J.R. Size-induced weakening and grain boundary-assisted deformation in 60 nm grained Ni nanopillars // Scripta Materialia. 2011. Vol. 64, Is. 1. P. 77–80.

РЕШЕНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ С УТОЧНЕНИЕМ ОТКЛИКА МАТЕРИАЛА В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТА МНОГОУРОВНЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Кондратьев Н.С.¹, Балдин М.Н.¹, Трусов П.В.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
kondratevns@gmail.com, mnbaldin@pstu.ru, tpv@matmod.pstu.ac.ru

Актуальной задачей является описание текущего состояния и эволюции внутренней структуры металлов и сплавов при моделировании процессов их неупругого деформирования. На основании данных о состоянии внутренней структуры существует возможность моделировать более детально свойства материалов и эксплуатационные характеристики изделий из них. При решении данной задачи применяются многоуровневые и многомасштабные физические конститутивные модели поликристаллических материалов, включающие в себя явное рассмотрение эволюции структуры материала [1]. Использование подобных моделей в исследованиях позволяет описывать такие процессы как разрушение [2], зарождение трещин [2], рекристаллизацию [3], учитывать анизотропию свойств изделий [4] и многое другое за счёт явного введения в рассмотрение внутренних переменных, отражающих перестроение структуры на более низких масштабных уровнях, чем макроуровень.

Существенным недостатком физических многоуровневых моделей с явным описанием внутренней структуры является необходимость для реализации вычислений чрезвычайно больших вычислительных ресурсов [5, 6]. В связи со стремительным ростом эффективности вычислительной техники и появлением более эффективных численных схем и алгоритмов, физические многоуровневые конститутивные модели пластичности на данный момент применяются, в том числе и к цельным заготовкам и изделиям, однако, только в случае их «грубой» дискретизации или при моделировании деформирования только отдельной части изделия [7, 8]. Вычислительная ресурсоёмкость данных задач остаётся чрезвычайно высокой и может многократно увеличиваться при моделировании значительных по размеру изделий или усложнении конститутивной модели для описания большего числа механизмов деформирования. Как следствие, проблема применения физических моделей к описанию напряженно-деформированного состояния (НДС) в процессах производства и эксплуатации изделий остаётся актуальной на настоящий момент.

Работа посвящена описанию и применению комбинированного подхода к моделированию напряженно-деформированного состояния изделий. С использованием макрофеноменологической конститутивной модели, основываясь на заданных условиях моделируемого процесса, информации о геометрии изделия и известных из экспериментальных данных о механических свойствах материала, решается краевая задача по определению НДС в каждой точке изделия. Решением данной задачи будут поля величин, характеризующих НДС во всех точках изделия. Для решения производственных задач как правило нет необходимости в определении состояния внутренней структуры в каждой точке изделия, поскольку достаточным является его определение в отдельной области, выбор которой уникален для каждой решаемой задачи и может быть связан, например, с возможностью разрушения изделия в данной области, определенной с использованием полученной информации о НДС. После выбора области, в которой необходима информация

о состоянии внутренней структуры производится постановка новой краевой задачи, граничные условия для которой определяются из ранее полученного решения для изделия в целом. При этом для решения указанной краевой задачи используется уже многоуровневая физическая модель, позволяющая получить подробную информацию о внутренней структуре в рассматриваемой области.

В рамках данной работы показана применимость сформулированного подхода. Для этого производится решение двух краевых задач с различными вариантами внешних воздействий, геометриями изделий и вариантами задания граничных условий с использованием многоуровневой физической модели и с использованием предлагаемого комбинированного подхода. Затем, оценивается близость информации о внутренней структуре материала в выбранной для подробного исследования в рамках комбинированного подхода области между решением, полученным с использованием многоуровневой конститутивной модели для всего изделия в целом и решением, полученным в рамках сформулированного комбинированного подхода. Близость с качественной и количественной точки зрения значений внутренних переменных, отражающих состояние внутренней структуры, может служить обоснованием применимости комбинированного подхода

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002).

Литература

- [1] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019. – 605 с.
- [2] Li C. et al. Microstructure evolution analysis of aviation bearing in service process based on CPFEM //Engineering Failure Analysis. – 2022. – Т. 142. – С. 106795.
- [3] Trusov P., Kondratev N., Podsedertsev A. Description of dynamic recrystallization by means of an advanced statistical multilevel model: Grain structure evolution analysis //Crystals. – 2022. – Т. 12. – №. 5. – С. 653.
- [4] Sahu V. K. et al. Micro-mechanisms of anisotropic deformation in the presence of notch in commercially pure Titanium: An in-situ study with CPFEM simulations //International Journal of Plasticity. – 2024. – Т. 177. – С. 103985.
- [5] Marin G. B. (ed.). Multiscale simulation and design. – Academic Press, 2011. – Т. 40. – 248 с.
- [6] Deymier P. A., Runge K., Muralidharan K. Multiscale Paradigms in Integrated Computational Materials Science and Engineering //Springer. – 2016. – Т. 10. – С. 13-106.
- [7] Knezevic M., Beyerlein I. J. Multiscale modeling of microstructure-property relationships of polycrystalline metals during thermo-mechanical deformation //Advanced Engineering Materials. – 2018. – Т. 20. – №. 4. – С. 1700956.
- [8] Bonte M. H. A., van den Boogaard A. H., Huétink J. An optimisation strategy for industrial metal forming processes: Modelling, screening and solving of optimisation problems in metal forming //Structural and Multidisciplinary optimization. – 2008. – Т. 35. – С. 571-586.



ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ТЯЖЕЛОГО УПРУГОГО ОРТОТРОПНОГО ЦИЛИНДРА, НАХОДЯЩЕГОСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕОДНОРОДНОГО БОКОВОГО ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ

Зайцев А.В., Коуров Р.Н.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
a-zaitsev@mail.ru

Необходимость решения задач для горизонтальных анизотропных цилиндрических тел, находящихся в поле гравитационных сил, обусловлена различными приложениями в промышленном и дорожном строительстве (конструкции и сооружения неглубокого залегания, облицовки туннелей), ракетно- и авиадвигателестроении. Кроме того, получение новых аналитических решений важно для инженеров, занимающихся уточненным прочностным анализом, тестированием алгоритмов при численном решении более сложных задач, отработкой методик эксперимента с тяжелыми горизонтальными цилиндрами для экспериментальной идентификации материальных констант и функций для анизотропных материалов. [1–3].

Получено новое аналитическое решение задачи о равновесии полого толстостенного тяжелого ортотропного цилиндрического тела со свободной от нагрузок незакрепленной внутренней поверхностью и находящегося под действием неравномерного внешнего бокового давления, моделирующего нахождение на опоре. При интегрировании неоднородной системы уравнений Ламе в цилиндрических и ортогональных координатах метод разделения переменных позволил понизить размерность задачи. Симметрия нагрузки относительно диаметральной вертикальной плоскости и геометрическая симметрия цилиндрического тела предопределили поиск решения системы уравнений Ламе в виде тригонометрических рядов по окружной координате, с записью коэффициентов разложения с помощью обобщенных степенных рядов по радиальной координате [4–12]. Площадь контактной поверхности цилиндра и ложемент предпологалась известной и неизменной, а реакция основания считалась заданной в виде квадратичной функции (на части внешней поверхности тела, не имеющей общих точек с основанием принималась равной нулю), на которую налагалось условие равенства ее интегральной суммы весу конструкции. Это предположение позволило записать граничные условия для определения постоянного интегрирования частного решения. Система внешних сил при $i=0$ и $i>1$ является самоуравновешивающейся (выполняется за счет симметрии нагрузки и геометрической симметрии цилиндрического тела). При $i=1$ внешняя неоднородная нагрузка уравновешивается массовыми силами. Полученная система уравнений Ламе однородна при $i=0$ и $i>1$, неоднородна при $i=1$. Вклад реакции основания учитывается слагаемыми $i>1$ в разложении нагрузки по окружной координате. Доказана сходимость решения в среднеквадратичном смысле по энергетической норме.

Вклад неравномерно распределенной реакции основания (1) учитывался 25 слагаемыми в разложении по окружной координате. Количество слагаемых в разложении гарантировало сходимость в среднеквадратичном смысле (сходимость по энергетической норме). Вопросы поточечной сходимости и оценка ее скорости должна будет исследоваться дополнительно. Из полученных решений в частном случае следуют выражения для напряжений, деформаций

и перемещений в точках полых анизотропных [5] и тяжелых изотропных цилиндров [4] с аналогичными граничными условиями.

Проанализировано распределение напряжений в поперечных сечениях тяжелых ортотропных цилиндров, на основе многокритериального подхода, описывающего различные механизмы разрушения, проведена оценка прочности по совокупности критериев. Обнаружены области материала, где разрушение от растяжения, сжатия и сдвига может быть инициировано.

Литература

- [1] Зайцев А.В., Кутергин А.В., Фукалов А.А. Равновесие анизотропных полых сферических и цилиндрических тел под действием массовых сил. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2015. – 139 с.
- [2] Зайцев А.В., Кутергин А.В. Упругое равновесие тяжелого горизонтального толстостенного ортотропного цилиндра, находящегося под действием неравномерно распределенного бокового давления // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2010. – № 4. – С. 36–45.
- [3] Зайцев А.В., Кислицын А.В., Кутергин А.В., Фукалов А.А. Распределение напряжений в поперечных сечениях контейнеров из стеклопластика и полимербетона, используемых для длительного хранения высокоагрессивных сред // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т. 14, № 4–5. – С. 1230–1234.
- [4] Кузнецов Г.Б. Упругость, вязкоупругость и длительная прочность цилиндрических и сферических тел. – М.: Наука, 1979. – 112 с.
- [5] Зайцев А.В., Кислицын А.В. Об одном решении задачи Ламе для составного протяженного элемента конструкции, состоящего из посаженных с натягом толстостенного трансверсально-изотропного внешнего цилиндра на соосный изотропный внутренний // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Физико-математические науки. – 2007. – № 1 (14). – С. 164–167.
- [6] Зайцев А.В., Фукалов А.А. Упругое равновесие тяжелой трансверсально-изотропной толстостенной сферы с жестко закрепленной внутренней поверхностью // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Физико-математические науки. – 2010. – № 5(21). – С. 85–95.
- [7] Зайцев А.В., Соколкин Ю.В., Фукалов А.А. Механизмы начального разрушения железобетонной крепи сферической горной выработки в массиве осадочных пород // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2013. – № 4. – С. 59–74.
- [8] Зайцев А.В., Соколкин Ю.В., Фукалов А.А. Равновесие жестко закрепленных по внешней поверхности тяжелых упругих анизотропных тел с центральной симметрией в поле гравитационных сил // Вестник Кыргызско-Российского Славянского ун-та. – 2017. – Т 1, № 8. – С. 13–17.
- [9] Zaitsev A.V., Sokolkin Yu.V., Fukalov A.A. Initial strength analysis of anisotropic concrete supports for spherical mine workings in a sedimentary rock mass // Physical and mathematical modeling of Earth and environment processes (2018): 4th Int. Sci. School for Young Scientists, Ishlinskii Institute for Problems in Mechanics of RAS / Eds. V. Karev, D. Klimov, K. Pokazeev. – Cham: Springer Nature Switzerland AG/Springer, 2019. – P. 463–471.
- [10] Зайцев А.В., Соколкин Ю.В., Фукалов А.А. Решение задачи Ламе для составных трансверсально-изотропных сфер с общим центром // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Физико-математические науки. – 2021. – Т. 25, № 1. – С. 83–96.
- [11] Фукалов А.А., Зайцев А.В., Соколкин Ю.В., Баяндин Ю.В. Равновесие жесткозакрепленной на внешней поверхности полый трансверсально-изотропной толстостенной сферы, находящейся под действием равномерного внутреннего давления и гравитационных сил // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Физико-математические науки. – 2021. – Т. 25, № 2. – С. 303–319.



ВЫЧИСЛЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫХ КОНСТАНТ ВЯЗКО-ГИПЕРУПРУГОЙ МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ АМОРТИЗАЦИОННОЙ РЕЗИНЫ

Бояршинов Д.А.^{1,2}, Сметанников О.Ю.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

²Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь
houston707@mail.ru

В настоящее время существует высокая потребность в системах пассивной вибрационной защиты, позволяющих снизить амплитуды колебаний ответственных частей конструкций. Данные системы используют высокоэластичные демпфирующие материалы, проявляющие ярко выраженные реологические свойства. При проектировании амортизационных систем с учетом современных требований к динамическим характеристикам необходимо применение математических моделей, учитывающих вязкоупругие и гиперупругие определяющие соотношения. Важным этапом разработки модели поведения амортизации является построение и применение методики идентификации вязко-гиперупругих свойств материала на основании данных различных натуральных испытаний образцов материала. Цель данной работы заключается в разработке методики вычисления материальных констант вязко-гиперупругой модели поведения материала, применении построенной методики на примере амортизационной резины на основании данных квазистатических испытаний и верификации полученных свойств по данным циклических испытаний демпферов.

При определении вязко-гиперупругих свойств материала часто используются аналитические решения задачи деформирования тела в нескольких напряженно-деформированных состояниях [1]. В данной работе методика идентификации материальных констант была построена на основании полученных полуаналитических решений задачи деформирования тела в условиях одноосного напряженного и одноосного деформированного состояний с учетом вязко-гиперупругого поведения. Определяющие соотношения были построены при использовании рядов Прони с принятием гипотезы постоянства модуля объемного сжатия для описания вязкоупругой части и двух вариантов потенциала энергии деформации при описании гиперупругого поведения: Муни-Ривлина с двумя константами и нео-Гука с учетом сжимаемости. Свойства амортизационной резины вычислялись по данным натуральных испытаний, проведенных в ИМСС УрО РАН и ПНИПУ. Были использованы данные экспериментов в условиях одноосного напряженного состояния при растяжении лопаток и сжатии цилиндров с различной скоростью деформирования и одноосного деформированного состояния при сжатии цилиндров. Исходя из дальнейшего применения определяемых констант в модели амортизатора, работающего в условиях циклического нагружения, испытания проходили по программе циклического деформирования образца от нулевой нагрузки до заданной амплитуды и обратно до нуля при трех амплитудах, повторяя проход три раза для установления кривой отклика. Методика идентификации вязко-гиперупругих свойств основывалась на минимизации отклонения кривых напряжений из результатов испытаний и вычисленных с помощью полуаналитических выражений с выбираемыми константами материала. Процесс минимизации производился в программном пакете MatLab с использованием метода Нелдера-Мида. Определение свойств материала проходило с учетом всей истории нагружения при вычислении напряжений, но для устранения влияния эффекта Маллинза отклонение вычисленных и экспериментально полученных напряжений



определялось только по последнему циклу деформирования. На основании результатов идентификации свойств материала было выявлено, что более простой потенциал энергии деформации нео-Гука описывает экспериментальные кривые отклика на близком уровне с потенциалом Муни-Ривлина с двумя константами.

Вычисленные свойства резины были верифицированы на данных натуральных испытаний амортизаторов с помощью конечно-элементных моделей квазистатического циклического деформирования амортизатора в поперечном и осевом направлении с учетом вязко-гиперупругого поведения материала и контактного взаимодействия с трением из работы [2], реализованных в программном комплексе ANSYS Workbench. Амортизатор состоит из стальных втулки, планки и шайбы, а также резинового вкладыша с вычисленными в данной работе свойствами. Симметрия амортизатора позволяет рассматривать четверть амортизатора при поперечном направлении деформирования и одну восьмую часть при осевом нагружении, а граничные условия на плоскостях симметрии представляют собой запрет на перемещения в нормальном направлении. Первые два этапа нагружения в модели заключаются в поджатии резинового вкладыша путем перемещения шайбы и нижней части втулки в осевом направлении к центру с последующим увеличением радиуса втулки для поджатия в поперечном направлении с целью моделирования предварительного натяга, образующегося в процессе сборки. Следующий этап моделирует релаксацию резины из-за термоциклирования амортизатора путем выдержки амортизатора в условиях предварительного натяга. На заключительном этапе нагружения задается циклическое перемещение планки в осевом или поперечном положительном и отрицательном направлении с амплитудой 0.6 мм и скоростью 3 мм/мин в течение трех циклов с запретом перемещений шайбы и втулки по всем осям. Вычисленные кривые силового отклика демпфера показали соответствие с экспериментальными данными.

В дальнейшем разработанная методика идентификации вязко-гиперупругих констант материала с использованием данных натуральных испытаний будет использована для построения математической модели поведения системы амортизации в условиях вибрационного воздействия в целях улучшения динамических характеристик с помощью определения новых конструкторских решений.

Литература

- [1] Адамов А.А. Исследование и моделирование нестационарного термомеханического поведения вязкоупругих резиноподобных материалов и элементов конструкций при конечных деформациях – диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – Пермь, 2004. – 303 с.
- [2] Бояршинов Д.А., Сметанников О.Ю. Модель термомеханического поведения амортизационного узла // Вычислительная механика сплошных сред. – 2022. – № 3. – С. 303-315.



О СПЕЦИФИКЕ ЯВЛЕНИЯ АКУСТОУПРУГОСТИ НА ПРИМЕРЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ИЗ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

Ерофеев В.И.¹, Павлов И.С.¹, Егоров М.А.²

¹Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального исследовательского центра Института прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
erof.vi@yandex.ru, ispavlov@mail.ru, egorowmarck@yandex.ru

Рассмотрена модель конструкционного материала в виде простой кубической решетки из жестких сферических частиц (зерен), обладающих массой M и диаметром d . В исходном состоянии они сосредоточены в узлах решетки с периодом a . Каждая частица имеет шесть степеней свободы: три трансляционных и три ротационных.

Пространство между зернами представляет собой безмассовую упругую среду, через которую передаются силовые и моментные воздействия. Считается, что каждая частица взаимодействует лишь с 26 ближайшими соседями – частицами первых трех координационных сфер. Взаимодействия между частицами моделируются между частицами введем линейные упругие пружины пяти типов: центральные с жесткостью K_0 , соединяющие центры масс соседних частиц, нецентральные с жесткостью K_1 , диагональные (K_2), а также пружины с жесткостями K_3 и K_4 , соединяющие центральную частицу с частицами, соответственно, второй и третьей координационных сфер. Для учета и описания внутренних напряжений, часто возникающих в конструкционном материале, введены начальные деформации пружин всех пяти типов.

Выведены дифференциальные уравнения, описывающие распространение и взаимодействие акустических волн в такой среде. Установлена взаимосвязь между скоростями распространения волн и величиной малой деформации, возникающей в структуре при внешнем воздействии. Получены и проанализированы аналитические выражения, определяющие разницу квадратов скоростей продольных, а также сдвиговых волн, распространяющихся в двух взаимно-перпендикулярных направлениях материала с наведенной внешним воздействием анизотропией.

Проведенные теоретические исследования могут быть полезны при изучении явления акустоупругости [1] в конструкционных материалах с микроструктурой. Полученные результаты можно использовать в качестве критерия для выявления отличия исследуемой среды от классической на основе проведенных в ней акустических измерений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-19-00613.

Литература

[1] Destrade M., Gilchrist M.D., Saccomandi G. Third- and fourth-order constants of incompressible soft solids and the acousto-elastic effect // J. Acoust. Soc. Am. 2010. Vol. 127. No 5. P. 2759-2763.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗГИБНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ МЕТОДОМ АКУСТОУПРУГОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН РЭЛЕЯ

Ерофеева И.В.^{1,2}, Ерофеев В.И.^{1,2}, Родюшкин В.М.¹

¹Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального исследовательского центра Института прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
erofeewa.ira2014@yandex.ru, erof.vi@yandex.ru, vlkn@yandex.ru

Работа посвящена определению изгибных напряжений в стальных образцах методом акустоупругости с использованием поверхностной волны Рэлея. Эффект акустоупругости заключается в зависимости скорости распространения упругой волны в материале от напряжений [1, 2]. С помощью волн расширения-сжатия и сдвига объемные напряжения, вызванные эффектами растяжения или сжатия, хорошо измеряются, но напряжения, вызванные изгибом образца, не могут отслеживаться этими волнами. Волны показывают напряженное состояние, усредненное по толщине образца. Но если образец материала был согнут, то все его продольные волокна, которые находятся выше срединной линии поперечного сечения, будут растягиваться, и все продольные волокна, которые находятся ниже срединной линии, будут сжиматься. В этом случае объемные волны покажут, что в образце нет напряжений, но это не так. Поэтому для определения напряжений, вызванных изгибом, необходимо использовать такие волны, которые показывают не среднее значение по сечению, а максимальные значения напряжений. Максимальные значения изгибающих напряжений будут на поверхности образца, и такие напряжения должна позволить измерять поверхностная волна Рэлея.

Образец был зафиксирован в рукоятках испытательной машины Tinius Olsen, которая допускает ударную силу до 100 кН (приблизительно 10 тонн). Но сначала нужно было определить механические характеристики материала. Напряженное состояние создавалось в калибровочном образце из стали 20 с размерами 370 * 8 * 30 мм. Образец был зафиксирован в рукоятках испытательной машины, это позволяло задавать нагрузку до 100 кН (примерно 10 тонн). На испытательной машине была получена диаграмма растяжения образца, из которой следует: предел прочности при растяжении составляет 463 МПа, модуль упругости составляет 211,0 ГПа. Поверхностная волна Рэлея создавалась пьезоэлектрическими преобразователями (ПП) с частотой колебаний 2 МГц. Длина волны при скорости распространения приблизительно 3000 м / с равна 1,5 мм, что позволяет использовать ее для контроля изгибных напряжений на образце 8 мм, поскольку глубина проникновения поверхностной волны в материал составляет 1,5–2 длины волны [3]. Излучающий и приемный ПП устанавливались на фиксированном расстоянии друг от друга с помощью специального механического устройства. Возбуждение излучающего ПП производилось с помощью дефектоскопа, и от приемного ПП сигнал поступал на измеритель временных интервалов, для которых использовался осциллограф с временным разрешением в одну наносекунду.

Была установлена связь между временем распространения волны Рэлея и изгибным напряжением, которое должно было быть определено. Таким образом, удалось показать, что метод акустоупругости обладает большим потенциалом, чем принято считать, то есть, если использовать не объемные, а поверхностные волны, метод позволяет определять не только растягивающие и сжимающие напряжения, но и изгибные напряжения.

Сегодня метод акустоупругости успешно применяется для определения напряженного состояния многих объектов и конструкций [4], среди которых технологические трубопроводы газоперекачивающих компрессорных станций [5], элементы магистральных газопроводов со сварным швом [6], рельсы [7] и ободья железнодорожных колес [8], крупногабаритные молотовые штампы [9]. Совершенствование этого перспективного метода очень важно.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 20-19-00613.

Литература

- [1] Никитина Н.Е. Акустоупругость: Опыт практического применения – Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2005. – 208 с.
- [2] Углов А.Л., Ерофеев В.И., Смирнов А.Н. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации – М.: Наука, 2009. – 280 с.
- [3] Неразрушающий контроль. Том 4. Справочник. Под общ. ред. В.В. Клюева / Кн. 1. В.А. Анисимов, Б.И. Каторгин, А.Н. Куценко и др. Акустическая тензометрия – М.: Машиностроение, 2004. – 736 с.
- [4] ГОСТ Р 56664-2015. Контроль неразрушающий. Определение напряженного состояния материала изделий машиностроения методом акустоупругости. Общие требования. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 октября 2015 г. № 1615-ст – М.: Стандартформ, 2016. – 15 с.
- [5] Никитина Н. Е., Камышев А. В., Казачек С. В. Учет температурного фактора при ультразвуковом контроле напряженного состояния трубопроводов // Дефектоскопия. 2012. № 5. – С. 20-25.
- [6] Булдакова И. В., Волкова Л. В., Муравьев В. В. Распределение напряжений в образцах труб магистральных газопроводов со сварным соединением // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т.18. № 1. – С. 4-8.
- [7] Курашкин К.В., Кириллов А.Г., Гончар А.В. Использование головных волн для определения остаточных и температурных напряжений в рельсах // Акустический журнал. 2024. Т. 70. № 1. – С. 49-56.
- [8] Муравьев В. В., Петров С. Ю., Волкова Л. В. Распределение остаточных напряжений в железнодорожных колесах после электроконтактного упрочнения поверхности катания // Дефектоскопия. 2015. № 10. – С. 64-74.
- [9] Хлыбов А.А., Рябов Д.А., Минков К.А. Контроль остаточных напряжений в образцах из стали 5ХНМ акустическим методом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 9. – С.30-36.



ГИБРИДНЫЙ ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ О ВОЗБУЖДЕНИИ, РАСПРОСТРАНЕНИИ И ДИФРАКЦИИ SH-ВОЛН В ВОЛНОВОДАХ С МНОЖЕСТВЕННЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

Нец П.А.¹, Евдокимов А.А.¹

¹Кубанский государственный университет, Институт математики, механики и
информатики, Краснодар

polina.nec@mail.ru, evdokimovmail27@gmail.com

В рамках данной работы предлагается гибридный численно-аналитический подход, направленный на решения задач волновой динамики в многослойных упругих волноводах. Подобного рода задачи возникают при проведении ультразвукового неразрушающего контроля (Non-Destructive Testing - NDT в зарубежной литературе), при проектировании систем волнового мониторинга состояния конструкций (Structural Health Monitoring - SHM) [1,2], при проведении сейсмического зондирования и т.д. Построение аналитического решения возникающих задач не всегда возможно и достаточно трудозатратно, поэтому чаще применяются численные методы решения. Среди них выделяются методы, основанные на сеточной аппроксимации, такие как метод конечных элементов (МКЭ) или метод конечных разностей, которые реализованы в виде свободно распространяемого или коммерческого программного обеспечения. Данное программное обеспечение обладает наглядным пользовательским интерфейсом, широким инструментарием для моделирования различных материалов и геометрий, что существенно облегчает решение задач NDT и SHM. Однако, при моделировании реальных задач возникают дополнительные проблемы, связанные с существенными вычислительными затратами при решении задач волновой динамики для протяженных структур с несколькими неоднородностями. Это связано с необходимостью уплотнения сетки в окрестности препятствий и уменьшения размера конечного элемента с ростом частоты колебаний. Кроме того, зачастую требуется дополнительная постобработка МКЭ-результатов для получения физически наглядной волновой картины возбуждения, распространения, рассеивания волн на препятствиях и распределения энергии между модами различных типов.

Естественными способами преодоления указанных проблем являются гибридные подходы, позволяющие стыковать численные решения с аналитическими представлениями. В данной работе рассматривается дальнейшее развитие гибридного численно-аналитического подхода, предложенного в работах [3,4]. В указанных работах рассматривался бесконечный волновод, разбиваемый на несколько частей: локальная область, содержащая в себе некоторую неоднородность (источник колебаний, дефект, геометрические неоднородности т.п.), и пара глобальных однородных полубесконечных областей. Вблизи неоднородности строился набор МКЭ-решений вспомогательных задач, имитирующих отток и приток волновой энергии из локальной области. В глобальных областях решение исходной задачи представляется в виде суммы бегущих волн с неизвестными коэффициентами, определяемыми исходя из условий непрерывности смещений и напряжений на границе раздела локальной и глобальных областей. Для построения локальных решений использовался пакет COMSOL Multiphysics, позволяющий моделировать разнообразные материалы, геометрии и дефекты. Например, в рамках данного пакета легко моделировать пьезокерамику часто используемую при создании

SHM-систем. Однако, сам подход не предполагает обязательного применения МКЭ. Необходима лишь возможность построения численного решения для ограниченной области с известными граничными условиями, поэтому пакет COMSOL может быть заменен на любой другой МКЭ-пакет или на пакеты реализующие, например, метод конечных разностей или метод граничных элементов.

Данная работы предлагает обобщение сформулированной схемы [3,4] на случай задачи о возбуждении и распространении SH-волн в многослойной упругой полосе, содержащей произвольное конечное количество локализованных неоднородностей. Как и ранее решение в локальных областях, содержащих неоднородности, строится численно, а в однородных частях волновода представляется в виде суперпозиции нормальных волн, порождаемых соседними областями с неоднородностями. С одной стороны, модифицированная в таком случае схема позволяет сократить затраты, связанные с МКЭ-моделированием промежуточных конечных однородных областей между двумя соседними неоднородностями, а с другой стороны предоставляет инструментарий для более детального анализа соответствующих волновых процессов. Так, для задачи «источник колебаний – дефект – сенсор» можно оценить вклад в отклик сенсора каждой отдельной моды, учитывая особенности ее возбуждения выбранным типом актуатора и рассеяния на препятствии. Подобный анализ невозможен в рамках численного решения исходной задачи МКЭ с поглощающими граничными условиями. Описанный в данном докладе на примере возбуждения, распространения и дифракции SH-волн в многослойном волноводе гибридный численно-аналитический подход допускает обобщение на случай многослойных изотропных или анизотропных материалов. Данные случаи будут рассмотрены в последующих работах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-71-00105, <https://rscf.ru/project/24-71-00105/>.

Литература

- [1] Raghavan A., Cesnik C.E.S. Review of guided-wave Structural Health Monitoring // The Shock and Vibration Digest. 2007. Vol. 39. P. 91–114.
- [2] Giurgiutiu V. Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors, 2nd Edition. New-York: Elsevier Academic Press, 2014. 1032 p.
- [3] Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Евдокимов А.А. Гибридная численно-аналитическая схема для расчета дифракции упругих волн в локально неоднородных волноводах // Акустический журнал. 2018. Т. 64. № 1. С. 3-12.
- [4] Glushkov E., Glushkova N., Evdokimov A. Hybrid Numerical-Analytical Scheme for Locally Inhomogeneous Elastic Waveguides // Proceedings of 14th World Congress on Computational Mechanics (WCCM) ECCOMAS Congress 2020: Paris, 11 - 15 January 2021, Vol. 700, pp. 1 – 12.

КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ТИТАНОВЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ ДИНАМИЧЕСКОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Оборин В.А., Банников М.В., Соковиков М.А., Наймарк О.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

oborin@icmm.ru

В работе проведено экспериментальное и теоретическое исследование закономерностей процесса разрушения на различных структурных уровнях материалов авиационного моторостроения в титановых и алюминиевых сплавах (ВТ6, АМг6) в условиях лабораторных экспериментов, максимально соответствующих распространенной в приложениях ситуации – катастрофическому уменьшению прочности элементов авиационных двигателей (лопаток вентиляторов) при случайном высокоскоростном соударении с твердыми частицами [1-2] и последующем неконтролируемом традиционными методами снижении усталостного ресурса.

Предварительное нагружение образцов осуществлялось динамическим растяжением на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского при скоростях деформации до $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$, после чего образцы подвергались сверхмногоцикловым (гигацикловым) [3-4] нагрузкам на испытательной машине резонансного типа Shimadzu USF-2000 при принудительном воздушном охлаждении сжатым воздухом с последующим изучением фрактографии изломов разрушенных образцов. Ультразвуковая испытательная машина позволяет испытывать материалы на базе $10^9 - 10^{10}$ циклов с амплитудой от 1-го и до нескольких десятков микрон с частотой 20 кГц, что сокращает время испытания до нескольких дней.

Снижение предельного напряжения разрушения предварительно нагруженного (на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского) сплава ВТ6 с уровня напряжения 450 МПа в исходном (недеформированном) состоянии до уровня напряжений 130 МПа достигало 71%, соответствующего критическому количеству циклов $\sim 1,3 \cdot 10^8$. Обнаружено снижение на 15-25% предельного напряжения разрушения предварительно динамически нагруженного сплава АМг6 с уровня напряжения 162 МПа в исходном (недеформированном) состоянии до уровня напряжений 121-138 МПа, соответствующего критическому количеству циклов $\sim 7,5 \cdot 10^8$ при воздушном охлаждении образцов.

В работе предложено оригинальное кинетическое уравнение, устанавливающее связь между скоростью роста усталостной трещины, изменением коэффициента интенсивности напряжений и масштабными инвариантами, характеризующими коррелированное поведение дефектов различных структурных уровней. Показана связь параметров кинетического уравнения (показателем степени в обобщенном законе Пэриса) с масштабными инвариантами дефектных структур, формирующих рельеф поверхности разрушения в процессе сверхмногоциклового нагружения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 21-79-30041,
<https://rscf.ru/en/project/21-79-30041/>



Литература

- [1] Peters J.O., Ritchie R.O. Influence of foreign object damage on crack initiation and early crack growth during high-cycle fatigue of Ti-6Al-4V // Eng. Fract. Mech. – 2000. – Vol. 67. – P. 193-207.
- [2] Spanrad S., Tong J. Characterisation of foreign object damage (FOD) and early fatigue crack growth in laser shock peened Ti-6Al-4V aerofoil specimens // Materials Science and Engineering A. – 2011. – Vol. 528. – P. 2128–2136.
- [3] Ботвина Л.Р. Гигацикловая усталость – новая проблема физики и механики разрушения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – Т. 70. – № 4. – С. 41.
- [4] Bathias C., Paris P.C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice – Marcel Dekker Publisher Co, 2005. – 328 p.

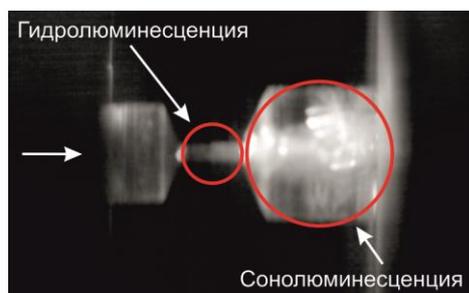
СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИГНАЛОВ СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ КАВИТАЦИИ

Ефремов Д.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б.

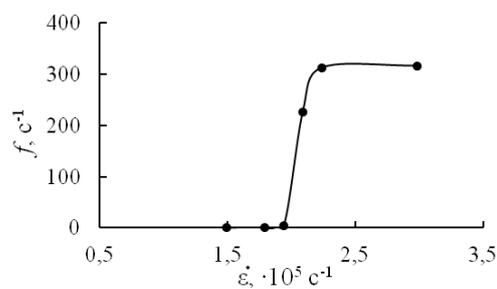
Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
efremov.d@icmm.ru, usv@icmm.ru, naimark@icmm.ru

Работа посвящена экспериментальному исследованию явлений гидролюминесценции (ГЛ) и сонолюминесценции (СЛ) при пропускании гидравлического масла через узкий канал. Под ГЛ понимается эффект эмиссии света жидкостью, возникающей в интенсивных гидродинамических потоках. Механизм ГЛ существенно зависит от наличия стенок канала, чем больше диаметр узкого канала, тем большую скорость протекания жидкости необходимо создать, чтобы зафиксировать свечение [1]. Эмиссия света при СЛ происходит при схлопывании кавитационных пузырьков, вызванных гидродинамическими эффектами. Обсуждаются две основные теории возникновения СЛ – «тепловая» и «электрическая». В основе «тепловой» теории лежит предположение, что источником свечения является образовавшийся плазменный сгусток со средней температурой 10^4 К [2]. В работе [3] сформулирована теория локальной электризации кавитационных пузырьков, которая согласуется с большинством экспериментальных данных. В жидкостях у поверхности раздела с кавитационным пузырьком образуется двойной электрический слой, включающий в себя плотный неподвижный слой и удаленный подвижный диффузионный слой. В акустических потоках кавитационные пузырьки деформируются, расщепляются, удаленная подвижная часть двойного электрического слоя «смывается»; возникает нескомпенсированный электрический заряд, что приводит к электрическому пробое и возникновению свечения.

Регистрация явлений ГЛ и СЛ осуществлялась на гидравлическом масле MOBIL DTE-25 в диапазоне градиентов давления $\nabla P \sim 0,7 \div 5$ ГПа/м с использованием оригинальной установки [4]. Видеокадр наблюдения люминесценции, полученный с помощью высокоскоростной видеокамеры, показан на рисунке 1а, на котором видны интенсивные свечения жидкости – ГЛ в канале и СЛ в диффузоре. На рисунке 2б представлена зависимость числа сигналов ГЛ и СЛ, регистрируемых с помощью фотоумножителя, от скорости деформации, которая иллюстрирует резкое увеличение интенсивности ГЛ и СЛ при пороговых значениях скорости деформации $\sim 10^5$ с⁻¹ ($\nabla P \sim 1.2$ ГПа/м, $Re \sim 1350$).



а)



б)

Рисунок 1 – Наблюдение развитой ГЛ и СЛ в канале ($\nabla P \sim 5$ ГПа/м) (а); число сигналов ГЛ и СЛ, регистрируемых фотоумножителем, от скорости деформации в канале (б).

Статистический анализ времен ожидания между сигналами не установил качественных различий в законах распределений. Распределение времён следования импульсов ГЛ и СЛ соответствует экспоненциальному закону. В свою очередь статистический анализ амплитуд сигналов показал качественные различия в законах распределений. Сигналы СЛ значительно интенсивнее, чем сигналы ГЛ. Распределение амплитуд сигналов СЛ соответствует распределению Вейбулла. Распределение амплитуд сигналов ГЛ соответствует степенному распределению [5].

Полученные экспериментальные и теоретические результаты позволили разработать метод и лабораторный стенд для регистрации кавитации и оценки кавитационной эрозии узлов и деталей гидросистем (патент РФ № 2796207). Суть метода заключается в регистрации явления СЛ при пропускании жидкости через узкий канал 1 (Рис. 2), разделение измерительного контура (поз. 1-3, 12,13) и контура напора (поз. 6-11) позволяет исследовать различные технические жидкости, в том числе агрессивные к деталям гидравлического насоса 8. Разработанный стенд может использоваться для проведения фундаментальных исследований явлений ГЛ и СЛ в соответствии с оригинальными результатами авторов

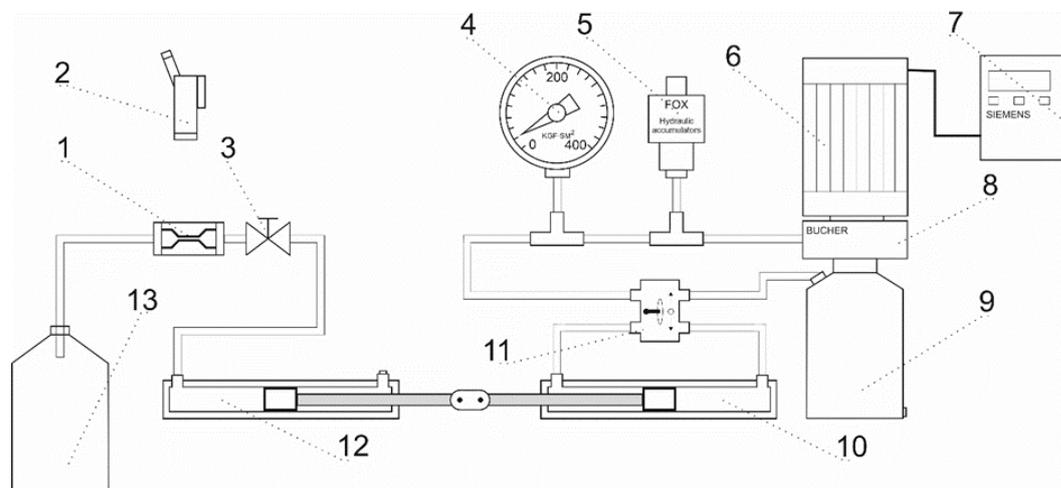


Рисунок 2 – Схема двухконтурной экспериментальной установки для исследования ГЛ и СЛ. Работа выполнена в рамках госзадания, регистрационный номер темы 124020200116-1.

Литература

- [1] Герценштейн С.Я., Монахов А.А. Электризация и свечение жидкости в коаксиальном канале с диэлектрическими стенками / Механика жидкости и газа. 2009. № 3. С. 114–119
- [2] Колдамасов А.И. Плазменное образование в кавитирующей диэлектрической жидкости / ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 2. С. 188–190
- [3] Маргулис М.А. Сонолюминесценция / Успехи физических наук. 2000. Т. 170. № 3. С. 263–287
- [4] Ефремов Д.В., Уваров С.В., Дежкунов Н.В., Наймарк О.Б. Исследование стадийности развития кавитации в каналах по данным измерений гидро- и сонолюминесценции // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2024. Т. 90. № 6. С. 36-41.
- [5] Efremov D.V., Uvarov S.V., Naimark O.B. Experimental Study of Hydroand Sonoluminescence in Intense hydrodynamic Flows and a Method for Recording Cavitation // Proceedings of the XII All Russian Scientific Conference on Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics. XII CICMCM, 15–17 November 2023, Tomsk, Russia. M. Yu. Orlov and P. M. Visakh (Eds.). pp. 95–100. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-1872-6_14

ИЗМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ СКОРОСТИ ЗВУКА В КОМПОЗИТНОМ МАТЕРИАЛЕ КАК ПРИЗНАК ДЕГРАДАЦИИ СВОЙСТВ

Уваров С.В.

Институт Механики Сплошных Сред УрО РАН, Пермь
usv@icmm.ru,

В процессе эксплуатации конструктивные элементы силового оборудования, например, газотурбинных установок, которые находят применение от самолетов до многочисленных промышленных производств, могут подвергаться как циклическому усталостному нагружению, так и случайным воздействиям, в том числе динамическим. Возникает задача диагностики состояния конструктивных элементов, в том числе и в процессе эксплуатации. Эффективная скорость звука, измеренная как отношение расстояния между точками измерения к времени прохождения сигнала может служить мерой поврежденности материала в области между этими двумя точками. На время прохождения сигнала может влиять как появление крупных дефектов на прямой, соединяющей две точки измерения, которые приводят к нарушению сплошности материала и, как следствие, сильному затуханию акустического сигнала. В результате приёмник акустического сигнала регистрирует импульс, прошедший большой путь. Также наблюдается, и теоретически обосновано падение скорости звука при дисперсном накоплении поврежденности [1,2].

В данной работе представлены результаты измерения эффективной скорости звука в конструктивно подобном элементе спрямляющего аппарата авиадвигателя (Рис. 1)

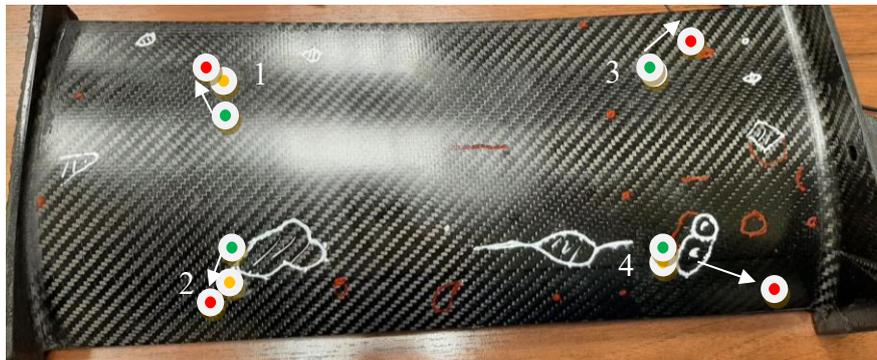


Рисунок 1. Конструктивно подобный элемент спрямляющего аппарата авиационного двигателя. Цифрами обозначены позиции датчиков. Жёлтые метки – реальное положение датчиков. Зелёные – результат локации до испытаний. Красные – результат локации после испытаний.

На образце крепились четыре идентичных датчика акустической эмиссии. Затем при помощи специального режима установки по регистрации акустической эмиссии AMSY6 один из датчиков переводился в режим излучателя импульсов, остальные три – в режим приёмника. Далее при помощи алгоритма локации определялось взаимное положение датчиков. Если бы испытания проводились в изотропном и бездефектном материале, то положение датчиков, измеренное при помощи локации совпало бы с реальным. Но даже ненагруженный образец являлся сильно анизотропным и результат локации (зелёные метки) не совпадал с реальным положением датчиков (жёлтые метки) (Рис. 1). Затем элемент нагружался до момента начала интенсивной акустической эмиссии и появления областей скопления (кластеров) источников



АЭ на карте локации. После чего было произведено ультразвуковое сканирование, которое показало наличие крупных дефектов. Также была выполнена такая же процедура взаимной локации датчиков акустической эмиссии. В результате было обнаружено, что локализованное положение датчиков сильно изменилось по сравнению с исходным. И смещение коррелирует с данными поврежденности, полученными ультразвуковой дефектоскопией и данными локации акустической эмиссии.

Также по результатам данной работы можно сделать вывод о том, что при регистрации акустической эмиссии на подобных образцах необходимо периодически проводить процедуру взаимной локации датчиков, чтобы более корректно сопоставлять данные локации и реальное положение источников сигнала.

Литература

- [1] Модель накопления повреждений в ортотропном композиционном материале / Ю. В. Баяндин, М. С. Головин, М. В. Банников, С. В. Уваров // Вычислительная механика сплошных сред. – 2024. – Т. 17, № 1. – С. 44-59. – DOI 10.7242/1999-6691/2024.17.1.5. – EDN BSCGMJ.
- [2] Модель ортотропного композиционного материала с учетом накопления повреждений / Ю. В. Баяндин, М. С. Головин, М. В. Банников, С. В. Уваров // XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике : сборник тезисов докладов : в 4 т., Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 года / Министерство науки и высшего образования РФ; Российская академия наук; Российский национальный комитет по теоретической и прикладной механике; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Том 3. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2023. – С. 509-511. – EDN WJNMVI.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ФОРМИРОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТОУПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Белянкова Т.И.¹, Ворович Е.И.², Калинин В.В.¹

¹Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону

²Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону
tbelen415@mail.ru, vkalin415@mail.ru

Интерес к сдвиговым горизонтально поляризованным акустическим волнам (SH - волнам) обусловлен их определенным преимуществом по сравнению с другими волнами [1]. Прежде всего они не связаны с другими типами волн, в частности, с вертикально поляризованными волнами Лэмба [2]. По сравнению с ними имеют гораздо более простой профиль смещения, более простое соотношение для частоты среза и, что наиболее важно, их простые дисперсионные характеристики приводят к более легкой интерпретации и надежной оценке в системах неразрушающего контроля [3]. В пьезокомпозитах, как правило, как пьезоэлектрическая, так и пьезомагнитная фазы используются вместе для преобразования электрической энергии в магнитную энергию и наоборот, что позволяет управлять свойствами материала. В настоящей работе исследуются особенности формирования и распространения SH-волн в двухкомпонентной магнитоэластичной пластине из неоднородных пьезоэлектрического и пьезомагнитного слоев. В качестве составляющих пьезоэлектрического и пьезомагнитного слоев пластины использованы PZT-5H и CoFe₂O₄. Включения пьезоэлектрического слоя представляет собой различные виды пьезокерамики на основе PZT с различными упругими, пьезоэлектрическими и диэлектрическими свойствами. Моделирование неоднородности пьезомагнитного слоя связано с формированием твердых растворов материалов слоев в узкой переходной области у границы раздела, на которых выполнены условия сцепления. На внешних поверхностях при свободном контакте с вакуумом и отсутствии механических напряжений рассмотрены четыре типа электрических и магнитных условий. Полагается, что неоднородные ПЭ и ПМ слои выполнены из функционально градиентного пьезоэлектрического материала (ФГПЭМ) и функционально градиентного пьезомагнитного материала (ФГПММ). Изменение свойств по толщине слоев определены выражениями ($n = 1, 2$) [4]:

$$\begin{aligned}\rho^{(n)} &= \rho_0^{(n)} F_\rho^{(n)}(x_2), \quad c_{ij}^{(n)} = c_{ij}^{0(n)} F_c^{(n)}(x_2), \quad e_{ij}^{(n)} = e_{ij}^{0(n)} F_e^{(n)}(x_2), \\ \varepsilon_{ij}^{(n)} &= \varepsilon_{ij}^{0(n)} F_\varepsilon^{(n)}(x_2), \quad f_{ij}^{(n)} = f_{ij}^{0(n)} F_f^{(n)}(x_2), \quad \mu_{ij}^{(n)} = \mu_{ij}^{0(n)} F_\mu^{(n)}(x_2).\end{aligned}$$

Здесь $\rho_0^{(n)}$ – плотность, $c_{ij}^{0(n)}, e_{ij}^{0(n)}, f_{ij}^{0(n)}, e_{ij}^{0(2)} = 0, f_{ij}^{0(1)} = 0$ – компоненты тензоров упругих, пьезоэлектрических и пьезомагнитных констант, $\varepsilon_{ij}^{0(n)}, \mu_{ij}^{0(n)}$ – компоненты тензоров диэлектрической и магнитной проницаемости основных ПЭ ($n = 1$) и ПМ ($n = 2$) материалов пластины. На рис. 1 а, б представлены функциональные зависимости изменения свойств ПЭ слоя при отсутствии изменений материала ПМ слоя (рис. 1, а) и зависимости изменения свойств ПЭ и ПМ слоев пластины (рис. 1 б). Цифрами 1, 2, 3 на рисунках отмечены кривые с локализацией неоднородности ПЭ слоя в середине, у внешней поверхности и у границы

раздела, кривая 4 отвечает изменению свойств ПМ слоя с локализацией неоднородности у границы раздела. Цифрой 0 отмечены кривые для однородных материалов.

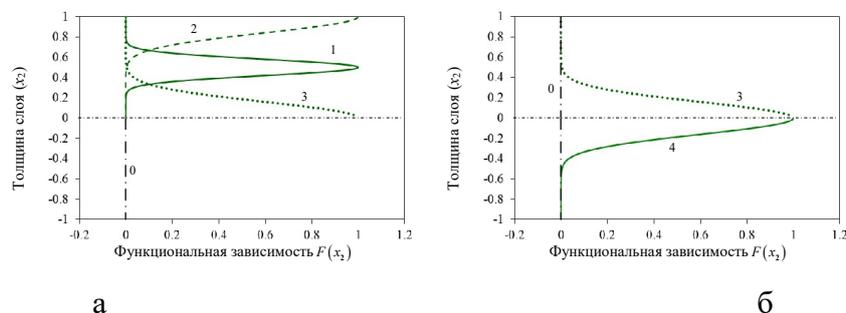


Рис.1. Графики функциональных зависимостей изменения свойств в пластине. (а) – изменение свойств в ПЭ слое, (б) – изменение свойств в ПЭ и ПМ слоях.

Методами операционного исчисления задача сведена к системе дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, которая в свою очередь сведена к системе задач Коши с начальными граничными условиями [4], для решения которых разработан мощный, обладающий высокой точностью математический аппарат. Это позволяет с высокой точностью исследовать влияние свойств компонент, определяющих характер градиентности материалов на скоростные параметры всей структуры [5].

Анализ показал, что наличие высокоскоростного включения в ПЭ слое приводит к увеличению скорости и сдвигу частот выхода мод по сравнению с пластиной из однородных материалов в сторону увеличения. При низкоскоростном включении – к уменьшению скорости и сдвигу частот выхода мод в сторону более низких значений. Наибольшее влияние на скоростные характеристики структуры оказывает включение, локализованное в приповерхностном слое. Локализация в срединной и приграничной областях оказывает одинаковое, но значительно меньшее влияние на скорость. Неоднородность ПМ слоя приводит к существенному изменению скоростных характеристик. Анализ показал, что наряду со скоростными характеристиками включения значительную роль играют его пьезомагнитные параметры. Используя материалы с различными пьезомагнитными параметрами можно целенаправленно изменять скоростные характеристики гетероструктуры, что открывает возможность управления процессом формирования структуры волнового поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда грант № 24-29-00773.

Литература

- [1] Schmid, S., Villanueva, L.G., Roukes, M.L. Fundamentals of Nanomechanical Resonators, vol. 49 – Springer, Berlin, 2016. – 175 p.
- [2] Cao, X., Shi, J., Jin, F.: Lamb wave propagation in the functionally graded piezoelectric-piezomagnetic material plate // Acta Mechanica. 2012. – V. 223. – No. 5. – p. 1081–1091.
- [3] Nie G., An Z., Liu, J. Sh-guidedwaves in layered piezoelectric/piezomagnetic plates // Prog. Nat. Sci. 2009. – V. 19. – No. 7. – p. 811–816
- [4] Белянкова Т.И., Ворович Е.И., Калинин В.В. Особенности распространения SH-волн в двухслойной структуре из неоднородных пьезоэлектрического и диэлектрического слоев // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2023. – № 2. – С. 98–109.
- [5] Белянкова Т.И., Ворович Е.И., Турчин А.С. SH-волны на поверхности биморфной магнитоэлектроупругой пластины // Наука юга России. – 2024. – Т. 20. – № 2. – С. 3–15.

МОНИТОРИНГ РАССЛОЕНИЯ СРЕДЫ ПО ПАРАМЕТРАМ ПОВЕРХНОСТНОГО-ВОЛНОВОГО ПОЛЯ

И.Е. Анджинович¹, А.С. Турчин^{1,2}

²Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

¹Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону

prottei@yandex.ru, ocean_8@mail.ru

Потребность в непрерывном мониторинге материалов и конструкций является одной из актуальных проблем. Контроль может осуществляться за счет использования различных физических принципов (тепловой, оптический, рентгеновский, ультразвуковой) [1-3] с применением дорогостоящей специализированной аппаратуры. Большое место в системе контроля занимают низкочастотные вибрационные методы, позволяющие осуществлять эффективный контроль процесса расслоения [4, 5]. Основная идея метода вибродиагностики повреждений заключается в том, что повреждение как совокупность различных режимов разрушения в виде потери локальной жесткости в конструкции изменяет ее динамические характеристики, т.е. модальные частоты, формы мод и модальное демпфирование. Предлагаемый в настоящей работе метод мониторинга процесса расслоения композиционных материалов основан на контроле изменения параметров распространяющихся волн, возбуждаемых на поверхности объекта импульсным источником, и последующем преобразовании полученного амплитудно-временного сигнала в определенную точку на плоскости. В качестве объекта исследования рассматривается балка из композиционного материала, обладающего малой скоростью распространения волн, с дефектом в виде горизонтальной трещины, моделирующем расслоение. Размеры балки 50x50x1000 мм, длина трещины 100 мм, глубина залегания трещины 10 мм, ширина вставки 20 мм. Схема изменения параметров расслоения представлена на рисунке 1. Для проверки эффективности контроля параметров поверхностного волнового поля использовалась многофункциональная измерительная система, которая включает в себя блок управления возбуждением импульсного сигнала, блок регистрации и блок математической обработки сигнала. Моделирование процесса изменения параметров трещины осуществляется

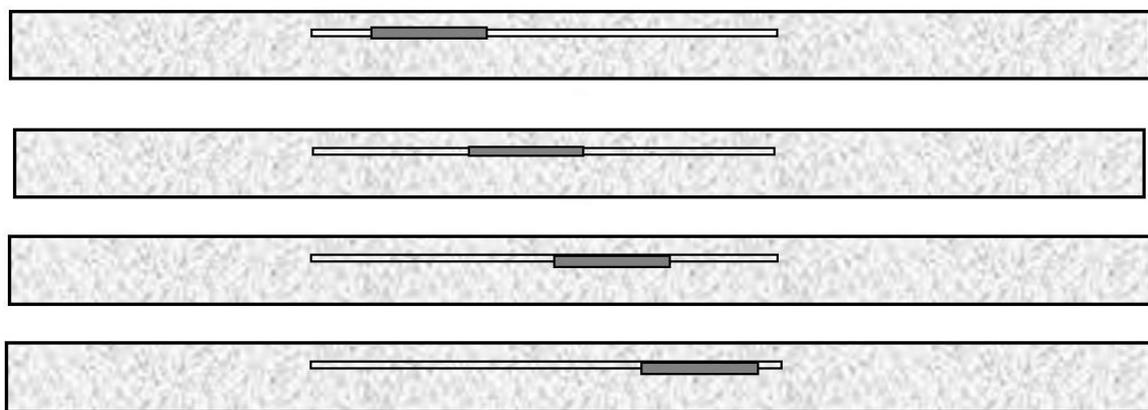


Рисунок 1. Изменение расположения вставки из жесткого материала внутри трещины. 5 мм; 10 мм; 15 мм; 20 мм

изменением положения жесткой вставки внутри трещины. Размеры вставки с одной стороны обеспечивают ее плотный контакт с берегами трещины, с другой стороны позволяют перемещать ее вдоль трещины. Изменение положения вставки вдоль трещины позволяет изменять параметры дефекта и, тем самым, влиять на структуру поля поверхностных волн. В настоящей работе представлен метод, позволяющий обнаружить перемещение вставки в трещине по изменениям поверхностного волнового поля, которое носит сложный характер. Этот метод позволяет обеспечить визуализацию контроля местоположения жесткого включения в трещине, которое контролируется тремя акселерометрами: перед дефектом, над дефектом и после дефекта. Он преобразует амплитудно-временной сигнал в определенную точку в двумерном пространстве признаков. Любое изменение параметров системы "трещина - жесткая вставка" приводит к изменению положения точки в пространстве признаков. Тем самым реализуется возможность контроля изменения параметров процесса расслоения по положению точки на плоскости. В проведенных исследованиях обнаружена высокая чувствительность предлагаемого подхода к изменению параметров системы "трещина - жесткая вставка". Положительным моментом является возможность использования данного подхода в качестве основы метода неразрушающего контроля, основанного на мониторинге изменения параметров волнового поля на поверхности объекта. Предлагаемый метод требует математической обработки регистрируемых сигналов с целью более наглядной визуализации изменения параметров трещины. В данной работе, из всех эффективных математических приемов, в качестве одного из наиболее перспективных выбрано оптимальное ортогональное разложение сигналов в базисе, адаптивно настраиваемом на обучающей выборке. Основное достоинство этого метода — адаптивная настройка ортогонального базиса в соответствии с критериями наилучшего распознавания дефектов. Как показал анализ, использование такого подхода демонстрирует четкое распознавание изменения местоположения включения - изменение параметров трещины с помощью акселерометра. В частности, акселерометр, расположенный над трещиной, проявляет большую чувствительность к изменению положения вставки в трещине по двум спектральным характеристикам. Важнейшим результатом проведенных экспериментальных исследований является то, что представленный в данной работе метод позволяет эффективно контролировать изменение параметров дефекта. Это обстоятельство может представлять значительный интерес для целей обеспечения безопасной эксплуатации композитных конструкций авиационно-космического назначения.

Литература

- [1] Zhao, Z., Review of non-destructive testing methods for defect detection of ceramics. *Ceramics International*, 2021, 47, 4389–4397.
- [2] Chaki, S., Harizi, W., Bourse, G., Ourak, M., Multi-technique approach for non destructive diagnostic of structural composite materials using bulk ultrasonic waves, guided waves, acoustic emission and infrared thermography. *Composites Part A. Applied Science and Manufacturing*, 2015, 78, 358–361.
- [3] Boopathy, G., Surendar, G., Nema, A., Anand, T.P.P., Review on non-destructive testing of composite materials in aircraft applications. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2017, 8, 1334–1342.
- [4] Rucevskis, S., Wesolowski, M., Chate, A., Damage detection in laminated composite beam by using vibration data. *Journal of Vibroengineering*, 2009, 11, 363–373.
- [5] Amezquita-Sanchez, J.P., Dominguez-Gonzalez, A., Sedaghati, R., Romero-Troncoso, R.d.J., Osornio-Rios, R.A., Vibration Control on Smart Civil Structures: A Review. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2014, 21, 23–38.

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРСТОЙКОСТИ ЗАЩИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СЕТЧАТЫХ ПРО-БИОНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЁТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ ИЗ-ЗА ИНТЕГРАЦИИ В КОНСТРУКЦИЮ КОМПОНЕНТОВ ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Чернов А.В.

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский
andrey.chernov@tsagi.ru

В рамках данной работы объектом исследований по ударной прочности являлась многоуровневая система защиты композитной конструкции сетчатого отсека фюзеляжа, интегрированная с элементами встроенной системой мониторинга. Рассмотрены несколько вариантов многоуровневой системы защиты с ударопоглощающими элементами, как на основе традиционных ударопоглощающих элементов, так и перспективных метаматериалов с изменяемой внутренней структурой.

На основе полученных в работе расчетных данных и результатов ранее проведенных расчетно-экспериментальных исследований, выполненных в других работах по данной теме [1-4] для предложенных вариантов системы защиты проведена оценка их ударостойкости, также оценка весовых и жесткостных характеристик. Для данных вариантов получена также зависимость критической деградации конструкции от уровня энергии ударного воздействия, учетом сохранения целостности оптоволоконных датчиков встроенной системы мониторинга внутреннего состояния конструкции.

Работа подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня “Сверхзвук” на 2020—2025 годы (соглашение от 17 мая 2022 г. № 075-15-2022-1023) и в рамках крупного научного проекта (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

Литература

- [1] И. О. Кондаков, А. В. Чернов, А. Н. Шаныгин, С. Б. Сапожников. Защита силовых элементов композитной сетчатой оболочки летательного аппарата от низкоскоростных локальных ударных воздействий. //Механика композитных материалов. — 2021. — Т. 57, № 6. — С. 1025—1036
- [2] Ivan Kondakov, Andrey Chernov, Natalya Guseva, Mikhail Levchenkov. Protective elements for lattice composite fuselage structures against low-velocity impacts. // Aerospace Systems. – volume 5, pages 1-9, 2022 <https://doi.org/10.1007/s42401-022-00130-4>
- [3] Andrey Chernov, Ivan Kondakov, Yury Mirgorodsky. Experimental study of impact-protective elements for unidirectional ribs of lattice composite aircraft structures. // MATEC Web Conferences 304, 01016 (2019), <https://doi.org/10.1051/mateconf/201930401016>
- [4] URL: <https://patents.google.com/patent/RU2558493C1/en> (дата обращения:12.07.2021)

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПОДЗЕМНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Горбач С.К.¹, Гусев Г.Н.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
gorbach.s@icmm.ru, gusev.g@icmm.ru

Строительство и эксплуатация подземных магистральных трубопроводов на подрабатываемых территориях требуют решения множества технически сложных задач. Дело в том, что подземная разработка пластов полезных ископаемых приводит к значительным деформациям в вышележащем грунтовом массиве, провоцируя опасные и даже катастрофические деформационные процессы [1-3]. Мульды сдвижения земной поверхности могут достигать размеров в несколько километров и разными своими частями оказывать влияние на попадающие в эту зону линейные сооружения, к которым относятся в том числе и магистральные трубопроводы. Задача оценки рисков и параметров безопасной эксплуатации осложняется тем, что у мульды сдвижения есть несколько зон с различными по знакам и амплитуде полями деформации, а протяженный линейный строительный объект, попадающий в зону влияния таких полей, испытывает сложное деформированное состояние. Большие диаметры трубопроводов, давление среды в несколько десятков атмосфер, вариации физико-механических свойств как материала труб, так и окружающего грунтового массива только усложняют оценку параметров безопасной эксплуатации. Одним из способов решить данную задачу является деформационный мониторинг такого рода систем. Правила мониторинга и способы контроля деформационной безопасности такого рода объектов прописаны в нормативной документации [4-5]. Однако нужно отметить, что существующие подходы являются достаточно общими и не отвечают на ряд поставленных выше вопросов. Требуется совершенствование и разработка новых методов и моделей интеллектуального деформационного мониторинга линейных строительных сооружений, которые расположены в зоне подрабатываемых территорий.

В настоящем исследовании предложена методика оценки деформационной безопасности подземных магистральных трубопроводов, выполненных из различных материалов. Предложен подход, который позволит на основе данных о параметрах сдвижения земной поверхности в зоне расположения нитки трубопровода и данных о физико-механических параметрах объекта прогнозировать его деформированное состояние. На основе результатов численного конечно-элементного моделирования осуществлена оценка допустимых и предельных деформаций грунтового массива с различными свойствами и для различных типов подземных магистральных трубопроводов. Произведены вычисления для ряда основных конструктивных материалов и режимов эксплуатации. За параметры предельного деформирования приняты те значения деформаций грунтового массива вдоль оси объекта, при которых в материале труб достигается предельное напряженное состояние. Задача решалась как в линейной постановке, так и с учетом нелинейного деформационного поведения материала труб (рисунок 1) и возможности контактного взаимодействия трубы с грунтовым массивом. Данные вычислений лягут в основу регламента безопасной эксплуатации линейных объектов в зоне подрабатываемых территорий.

Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы №124040500016-9.

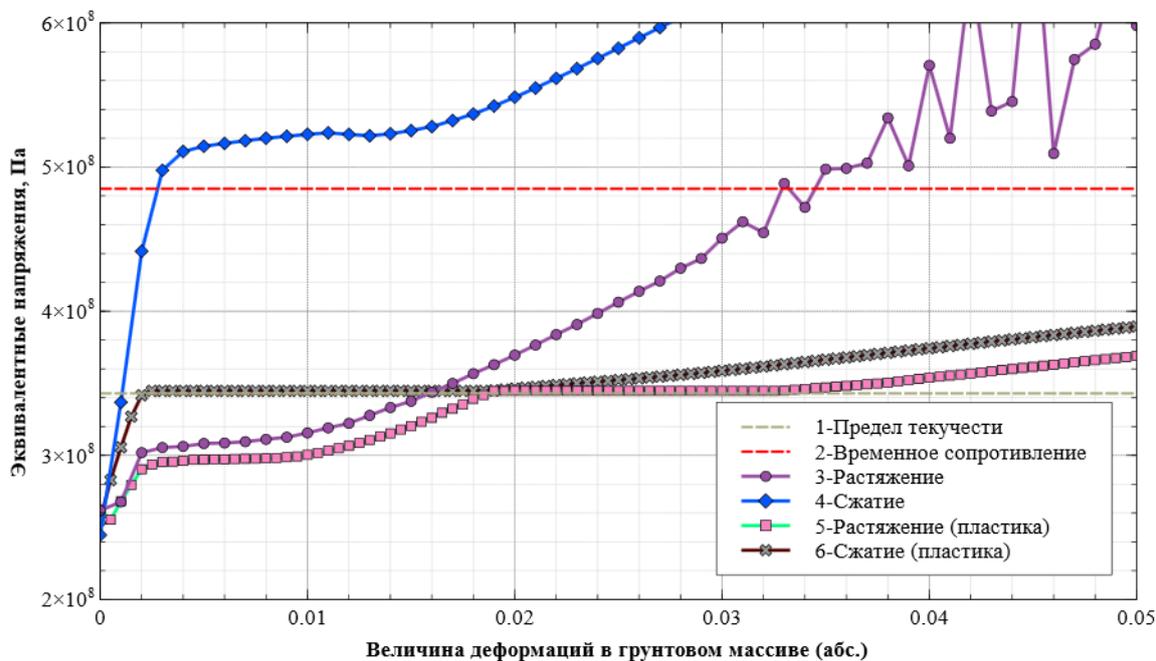


Рис.1 Результаты расчета одного из вариантов трубопровода. Материал – сталь 09Г2С.

Литература

[1] Ravet F. Transport Infrastructure Geohazard Risk Monitoring with Optical Fiber Distributed Sensors: Experience with Andean and Arctic Pipelines – FMGM 2018 Conference, July 2018.

[2] Kalisz P., Zięba M. Impact of mining exploitation on pipelines – Acta Montanistica Slovaca, Ročník 19(2014), číslo 3, 111-117.

[3] Rai A., Ahmad Z., Hasan M.J., Kim J.-M. A Novel Pipeline Leak Detection Technique Based on Acoustic Emission Features and Two-Sample Kolmogorov-Smirnov Test – Sensors, 2021, 21, 8247. – 13 p.

[4] Указания по допустимым условиям подработки эксплуатируемых зданий и сооружений на Верхнекамском месторождении калийных солей. -/Согласованы Ростехнадзором № 13-03-11/84 от 16.01.2008 г. / - С. - Петербург, 2008 г.

[5] ТСН 22-301-98 Здания на обрабатываемых территориях Верхнекамского месторождения калийных солей. Назначение строительных мер защиты.

ПРЯМОЙ ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ, ПОДВЕРЖЕННЫХ КИНЕМАТИЧЕСКОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ

Яваров А.В.^{1,2}, Тяпкина П.А.^{1,2}, Федосеев А.В.², Лалин В.В.^{1,3}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург

²ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург

³Российский университет дружбы народов, Москва

yavarov_av@spbstu.ru, polina.tyapkina@gmail.com

Проведение массовых взрывов при ведении горных работ открытым или подземным способом сопровождается, в том числе, возникновением интерференционного волнового поля, характеризующегося разнообразием классов и типов волн. Их распространение вызывает техногенное сейсмическое воздействие на расположенные в зоне влияния буровзрывных работ здания и сооружения.

Для обеспечения сейсмостойкости окружающей застройки проводится сейсмический мониторинг. На его первом этапе производится запись колебаний на фундаменте и других конструкциях здания во время взрывных работ и обработка полученных сигналов [1]. Далее, согласно принятой в горном деле практике, измеренные скорости колебаний элементов конструкций сравниваются с допустимыми значениями, приведенными в нормативных документах [2]. Данный подход не включает в себя проведение прочностных расчетов и, как правило, приводит к чрезмерным запасам прочности. В отдельных случаях, напротив, он может инициировать аварийную ситуацию ввиду слишком укрупненной классификации зданий и сооружений в зоне влияния массовых взрывов. Состав сейсмического мониторинга авторы доклада предлагают дополнить расчетом здания с использованием инструментальных записей колебаний.

В докладе излагается сущность методики проведения прямого динамического расчета сооружений на описанный выше вид сейсмического воздействия. Последовательно раскрываются процедуры построения конечно-элементных моделей в вычислительных комплексах [3,4] и их отличие по сравнению с моделями для решения статических задач. Для иллюстрации предложенной методики приводятся результаты расчета каркаса промышленного здания на сейсмическое (кинематическое) воздействие взрывных работ.

По сравнению с линейно-спектральным методом, который обычно применяют для расчета зданий, расположенных в сейсмически опасных районах [5,6], использованная в представленном докладе методика позволяет учесть малую продолжительность воздействия, вызванного массовым взрывом. Данная особенность рассматриваемого воздействия в сравнении с землетрясениями, среди прочего, выделяет описанные расчеты в отдельную группу задач [7].

Литература

[1] Тяпкина П.А., Яваров Федосеев А.В., А.В. Первичная обработка инструментальных записей колебаний сооружений, вызванных проведением буровзрывных работ // Инженерные исследования. №2 (17), 2024. С. 3-12.



- [2] Дарбинян Т.П., Федосеев А.В., Яваров А.В., Тяпкина П.А. Критерии оценки сейсмического воздействия взрывных работ на здания и сооружения в мировой практике и нормативных документах // Горный журнал. 2024. №3. С.17-24. DOI: 10.17580/gzh.2024.03.02.
- [3] Бате К.-Ю. Методы конечных элементов / К.-Ю. Бате; пер. с англ. В. П. Шидловского ; под ред. Л. И. Турчака. - Москва : Физматлит, 2010. - 1022 с. ISBN 978-5-9221-1181-2.
- [4] Гераймович Ю.Д., Евзеров И.Д., Киричок В.В. Колесников А.В. и другие Программный комплекс ЛИРА 10.12. Руководство пользователя. 2021. – 857 с.
- [5] СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81* – М.: Минрегион России. – 2018. – 238 с.
- [6] Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. - Москва : ДМК, 2008. - 595 с. ISBN 5-94074-352-8.
- [7] Нуждин Л.В., Михайлов В.С., Коновалова С.В. Уточнение методов оценки динамических нагрузок на фундаменты каркасных зданий в условиях техногенных сейсмических воздействий // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2019. № 3 (40). С. 53-60.

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ДЕФЕКТНОСТЬ СТАТОРНЫХ КОЛОНН ГИДРОТУРБИН ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ СРОКАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Анискович Е.В.

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий
(Красноярский филиал)
plaza1@mail.ru

Очень важным являются вопросы надежности и безопасности всех элементов ГЭС при ее эксплуатации [1], особенно после произошедшей катастрофы на Саяно-Шушенской ГЭС [2]. Исследования показали [3-7], что наибольшее количество дефектов выявляется в наиболее нагруженных элементах - рабочих колесах (РК) [8]. В данной статье описаны результаты выявления дефектов в статорных колоннах гидротурбин. Статорное кольцо с колоннами показано на рисунке 2 [9]. Статор турбины представляет собой ряд колонн с вытянутой удобообтекаемой формой поперечного сечения. Главной функцией статора является принятие нагрузок, действующих между верхним и нижним железобетонными конусами турбинной камеры, которые вызываются весом конструкций и оборудования, а также давлением воды.

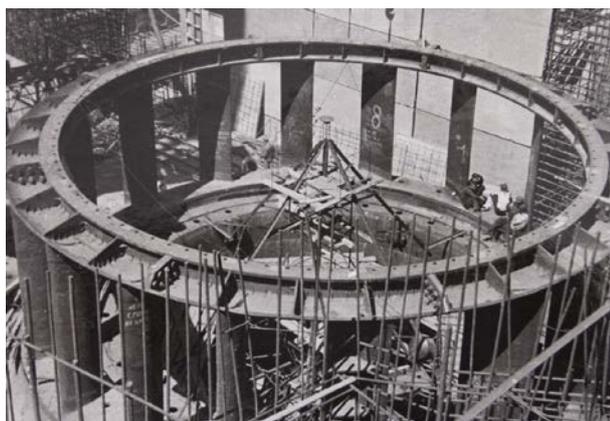


Рисунок 1. Статорное кольцо с колоннами Жигулевской ГЭС (архивное фото)

Колонны статора крепятся посредством анкеров в железобетон по отдельности или с целью большей жесткости и прочности объединяться стальными кольцевыми верхним и нижним поясами. Обязательным условием использования поясов является изготовление турбинной камеры из стали или наличие у камеры стальной облицовки. Угол установки и профиль сечения колонн статора выбираются таким образом, чтобы потери при их обтекании потоком воды были минимальными. Одна статорная колонна, замыкающая спираль - так называемый зуб спирали, делается фасонной.

Обследования статорных колонн проводилось неразрушающими и разрушающими методами контроля [5, 7, 9]. Поверхностные и подповерхностные дефекты выявлялись методами визуально-измерительного и капиллярного контроля (см. рисунок 2а, б). Внутренние дефекты находились с помощью ультразвукового метода (с помощью дефектоскопатографа A1550IntroVisor, примеры визуализации внутренних дефектов приведены на рисунке 2б) и металлографических исследований на микроскопе Альтами МЕТ-II (см. рисунок 2в).

По результатам обследования статорных колонн было выявлены следующие дефекты и несоответствия:

- Сквозные трещины, вышедшие на поверхность из зон концентрации напряжений сварных швов колонн (35 мм, 370 мм, 155 мм). При плановом ремонте они были устранены ремонтным способом.
- Поверхностные дефекты кавитационного характера – разного размера поры и язвы.

- Внутренние подповерхностные дефекты – средним размером 23x17 мм. Также выявлен один продолговатый дефект размером 250x14 мм.
- Многочисленные дефекты в виде неметаллических включений в структуре металла колонн. Оценка неметаллических включений производилась на нетравленном шлифе в соответствии с ГОСТ 1778-70 «Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений» методом Ш. По результатам исследования установлено, что количество неметаллических включений (точечных и строчных) соответствуют баллам 4 и 5 ГОСТ 1778-70.

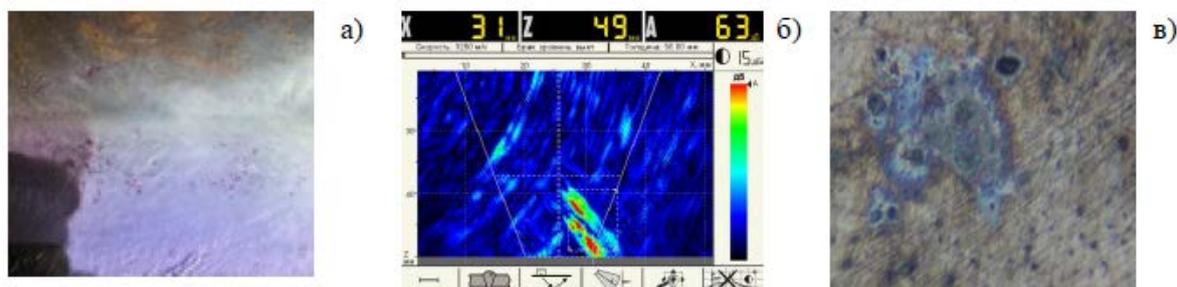


Рисунок 2. Капиллярный и ультразвуковой контроль (а, б), металлографические исследования структуры металла (в).

При плановом ремонте все недопустимые дефекты были устранены ремонтным способом. Однако, для определения причин образования трещин и прочих дефектов, в сварных швах и основном металле колонн была проведена оценка остаточных напряжений, заключающаяся в измерении остаточных напряжений на поверхности колонн вблизи сварного шва приварки колонн к кольцу статора. По результатам контроля получены, что при нормативном значении предела текучести материала колонн, равном 300 МПа, максимальное значение компонент напряжений σ_x , σ_y , τ_{xy} , а также главных напряжений σ_1 , σ_2 составили:

- для колонн с дефектами в виде трещин – на пределе текучести материала (0,9-0,95 σ_t);
- для колонн с внутренними дефектами и дефектами структуры металла – за пределом текучести материала (1,1-1,64 σ_t);
- для остальных колонн, с кавитационными поверхностными дефектами – ниже предела текучести материала (до 0,7 σ_t).

По результатам исследования можно сделать следующие выводы. Высокий уровень остаточных напряжений статорных колонн явился основной причиной наличия трещин и внутренних дефектов. К другим причинам можно отнести концентрацию напряжений в ремонтных зонах, длительные сроки эксплуатации гидрооборудования.

Литература

- [1] О безопасности гидротехнических сооружений: федер. закон от 21.07.1997 № 117-ФЗ (ред. 03.07.2016 г. с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2017).
- [2] Разрушение гидроагрегата №2 Саяно-Шушенской ГЭС: причины и уроки. Сборник материалов (в 3 т.). – М.: НП «Гидроэнергетика России», 2013. Т1. 480 с. Т2. 496 с. Т3. 408 с.



- [3] СТО 17330282.27.140.001-2006. Методика оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростанций. Утв. и введ. приказом от 13.07.2006 № 490 Росс. ОАО энергетики и электрификации «ЕЭС России». Дата введ. 01.08.2006, 281 с.
- [4] Анискович Е.В., Москвичев В.В., Черняев А.П. Анализ результатов диагностирования рабочих колес гидротурбин Красноярской ГЭС при длительных сроках эксплуатации // Гидротехническое строительство. 2019. №10. С. 19-27.
- [5] Трунин Е.С., Скворцов О.Б. Эксплуатационный контроль технического состояния гидроагрегатов / Электрические станции, 2010. № 6. С. 38-44.
- [6] Анискович Е.В., Москвичев В.В., Черняев А.П. Оценка остаточного ресурса рабочих колес гидротурбин с эксплуатационной дефектностью / Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2023. № 89(6). С. 62-75.
- [7] Михайлов В.Е., Хоменок Л.А., Судаков А.В., Обухов С.Г. К вопросу комплексного диагностирования и экспертизы состояния оборудования ТЭС и ГЭС. / Надежность и безопасность энергетики, 2010. № 2. С. 9-14.
- [8] Анискович Е.В., Москвичев В.В., Махутов Н.А., Разумовский И.А., Одинцев И.Н., Апальков А.А., Плутогарь А.А. Оценка остаточных напряжений в лопастях рабочих колес гидроагрегатов / Гидротехническое строительство, 2018. № 11. С. 178-184.
- [9] Александров А.Е., Незаметдинов Э.У., Сидоров А.А. Система диагностирования гидроагрегатов Жигулевской ГЭС / Гидротехническое строительство, 2005. № 5. С. 15-19.
- [10] Брызгалов В.И., Ключах А.А. Состояние рабочих колес гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС и основные направления по поддержанию их работоспособности / Гидротехническое строительство, 2000. № 1. С. 26-29.



СТРУКТУРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВТМО

Дементьев В.Б., Коршунов А.И.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН (УдмФИЦ УрО РАН), Институт механики, г. Ижевск.

demen@udman.ru, kai@udman.ru

Повышение эффективности функционирования машин и механизмов, обеспечение их эксплуатационной надежности естественным образом приводят к росту требований к физико-механическим свойствам конструкционных материалов, применяемых при их изготовлении. Конкретная деталь, получаемая в ходе реализации технологического процесса, ее свойства, определяются конкретными технологическими методами и решениями, применяемыми в производстве [1].

Значительную часть деталей, изготавливаемых в машиностроительном производстве, значительную часть, до 30 процентов, составляют так называемые осесимметричные детали. Несмотря на то, что в настоящее время неметаллические и композитные материалы получили широкое распространение, практика показывает, что для деталей подобной номенклатуры широко используются и, по-видимому, будут использоваться еще долгое время конструкционные и инструментальные углеродистые и легированные стали. Типичная технология изготовления подобных деталей предполагает, в соответствии с серийностью производства, использование в качестве исходной заготовки, в частности, цилиндрического и периодического горячекатаного проката, поковок свободной ковки и др. Специфика заключается в необходимости определения большой величины припуска на механическую обработку вследствие значительной толщины дефектного слоя и окалина на поверхности заготовки, а комплекс механических характеристик материала детали формируется операциями термообработки, сводящейся, как правило, к закалке с последующим отпуском, что требует возврата детали на механическую обработку для удаления оставшейся части припуска для обеспечения требований чертежа.

В настоящее время изготовление подобных деталей становится возможным с применением процессов термомеханической обработки. Для длинномерных толстостенных трубных заготовок предлагается калибровать заготовку, обеспечивая нормирование физико-механических свойств путем применения на первом этапе процесса изготовления технологии ВТМО с деформацией трубной металлургической заготовки винтовым обжатием в неприводной трехвалковой (трехроликовой) клетки на короткой удерживаемой охлаждаемой оправке [2]. Как показывают проведенные исследования, эта технология позволяет обеспечить точность размеров на уровне 9-11 квалитетов точности, разностенность на уровне 0,2 мм, непрямолинейность оси канала в диапазоне 0,2-0,25 мм, качество поверхности на уровне 1,25 мкм, а также сочетание высокой прочности и вязкости/ Такой набор свойств при управляемом объемном деформированном состоянии достигается за счет варьирования технологических режимов - степени деформации, относительного угла разворота деформирующих роликов, отношения диаметра роликов к катаемому диаметру, вылета оправки в очаге деформации, последеформационной паузы перед охлаждением, отношения расходов охладителя в наружном и внутреннем спреерах. Принципиальная технологическая схема ТМО заключается в непрерывно-последовательно проводимых нагреве, деформации и



охлаждении изделия (заготовки) в соответствии с определенными диапазонами временных, энергосиловых, термических параметров и режимов ТМО. Это обеспечивает направленное воздействие на структуру, морфологию фаз и компоненты объемного напряженно-деформированного состояния материала, которые, собственно, и формируют характеристики конструктивной прочности, точность и качество поверхности изделий.

В дальнейшей перспективе рассматривается задача формализации процессов термомеханического упрочнения (ТМУ) с учетом сложности их представления и отсутствия строгой функциональной зависимости между параметрами, режимами и показателями качества.

Литература

- [1] Дементьев В.Б., Иванова Т.Н., Коршунов А.И. Исследования влияния распространения температуры на состояние ножей горячей резки проката. // Химическая физика и мезоскопия. 2023. Т. 25, № 3, с. 406-414.
- [2] Сухих А.А., Дементьев В.Б., Махнева Т.М. Упрочнение толстостенных труб высокотемпературной термомеханической обработкой с градиентным по толщине стенки отпуском. // Химическая физика и мезоскопия. 2022. том 24, № 2, с. 228-237.

ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО УДАРНОГО УПРОЧНЕНИЯ

Изюмова А.Ю.¹, Вшивков А.Н.¹, Пантелеев И.А.¹, Плехов О.А.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

fedorova@icmm.ru, vshivkov.a@icmm.ru, pia@icmm.ru, poa@icmm.ru

Метод акустической эмиссии (АЭ) широко используется как в качестве одного из методов неразрушающего контроля состояния ответственных деталей и конструкций, так и в качестве метода для исследования процессов, сопровождающих рост и развитие поврежденности материалов [1-3]. Усталостные трещины являются наиболее распространенной причиной отказа деталей, работающих при циклических нагрузках.

Одним из современных способов упрочнения материалов, повышающих усталостную и коррозионную стойкость, является метод лазерной ударной (ЛУ) обработки [4-6]. На поверхность материала воздействуют высокомоощным короткоимпульсным лазером (длительность импульса порядка 10 нс, энергия в импульсе от 1 до 9 Дж), вследствие чего на поверхности материала образуется плазма. В результате ее быстрого расширения генерируется слабая ударная волна, которая распространяется в материале и пластически деформирует его. Структура материала в поверхностном слое претерпевает изменения, результатом этого является появление поля наведенных остаточных напряжений на глубине до 1 мм. Это влияет не только на возможности зарождения и развития усталостной трещины, но и на характеристики АЭ в процессе циклического деформирования. Мониторинг состояния такого материала методами неразрушающего контроля, в частности методом АЭ, приобретает актуальность, поскольку для оценки остаточного ресурса детали после ЛУ обработки необходимо понимать не только особенности сигналов АЭ, регистрируемых в обработанном материале, но и связывать их со степенью развития поврежденности и, на дальнейших этапах, усталостной трещины.

В ходе работы серия образцов из титанового сплава ВТ6 подвергалась ЛУ воздействию в зоне концентратора напряжений с целью замедления зарождения и развития усталостной трещины. Далее обработанные образцы испытывались в условиях циклического деформирования для демонстрации эффективности выбранного режима ЛУ упрочнения. На исследуемых образцах в процессе испытаний регистрировались длина трещины методом падения электрического потенциала и сигналы АЭ. На основе полученных экспериментальных данных был проведен кластерный анализ сигналов АЭ, в результате которого было показано, что сигналы АЭ явно разделяются на два кластера, что может свидетельствовать о наличии двух доминирующих источников, качественно отражающих два преобладающих механизма разрушения. Было показано, что на образцах после ЛУ обработки величина кумулятивной энергии сигналов АЭ в каждом из кластеров значительно выше по сравнению с базовыми образцами.

Таким образом, в результате ЛУ обработки наблюдаются значительные изменения в эволюции сигналов АЭ в процессе циклического деформирования образцов из титанового сплава ВТ6 с боковым полукруглым надрезом. Это косвенно свидетельствует о том, что ЛУ

обработка оказывает влияние на структурные характеристики материала, создавая поле остаточных напряжений и продлевая усталостный ресурс образцов.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10168

Литература

- [1] Степанова Л. Н. Акустико-эмиссионный контроль раннего зарождения дефектов в образцах из углепластика при статическом и тепловом нагружении / Л. Н. Степанова, В. В. Чернова, И. С. Рамазанов // Дефектоскопия. – 2020. – № 10. – С. 12-23. – DOI 10.31857/S0130308220100024.
- [2] Дмитриев А. А. Применение вейвлет-обработки к акустико-эмиссионным измерениям при растяжении титанового сплава ВТ 1-0 // Известия Алтайского государственного университета. – 2021. – № 4(120). – С. 30-34. – DOI 10.14258/izvasu(2021)4-04.
- [3] Wildemann, V., Strungar, E., Lobanov, D., Mugatarov, A., Chebotareva, E. Experimental Study of Postcritical Deformation Stage Realization in Layered Composites during Tension using Digital Image Correlation and Acoustic Emission // Acta Mechanica Sinica. – 2023. – <https://doi.org/10.1007/s10409-023-23468-x>. Доступна онлайн: <https://www.sciengine.com/AMS/doi/10.1007/s10409-023-23468-x>.
- [4] Deng, W., Wang, C., Lu, H., Meng, X., Wang, Z., Lv, J., Luo, K., Lu, J. Progressive developments, challenges and future trends in laser shock peening of metallic materials and alloys: A comprehensive review // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2023. – V. 191. – P. 104061. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2023.104061>
- [5] Jia, M., Wang, Y., Yue, J., Cao, C., Li, K., Yu, Y., Li, Y., Lu, Z. Recent progress in laser shock peening: Mechanism, laser systems and development prospects // Surfaces and Interfaces. – 2024. V. 44. – P. 103757. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103757>.
- [6] Wang, Z., Zhou, W., Luo, K., Lu, H., Lu, J. Strengthening mechanism in thermomechanical fatigue properties of Ti6Al4V titanium alloy by laser shock peening // International Journal of Fatigue. – 2023. – V. 172. – P. 107631. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107631>.

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ПРОКОВКИ

Гачегова Е.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

gachegova.e@icmm.ru

В настоящее время лазерная ударная проковка (ЛУП) является одним из наиболее перспективных методов поверхностного упрочнения металлов. Она позволяет увеличить ресурс обрабатываемых деталей, повысить их усталостные свойства и коррозионную стойкость [1-2]. Для достижения желаемого результата упрочнения необходимо подобрать множество различных параметров ЛУП. Одним из таких параметров является материал защитного слоя. Отсюда вытекает основная цель данной работы – исследование влияния материала этого слоя на микротвердость и распределение остаточных напряжений, которые создаются в приповерхностном слое в результате упрочнения.

Образцы были изготовлены из титанового сплава ВТ6 и представляли собой тонкие квадратные пластины со стороной 40 мм и толщиной 3 мм. Для обработки поверхности образцов использовался импульсный твердотельный лазер Nd:YAG с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 10 нс. В качестве защитных покрытий были выбраны следующие материалы: алюминиевая фольга, виниловая лента и черная алкидная краска. Также исследовался режим без покрытия. Измерения остаточных напряжений проводились методом сверления отверстий в соответствии с ГОСТ Р 71316-2024 [3].

В результате эксперимента были сделаны следующие выводы. Все три покрытия выдержали обработку с выбранными параметрами. Шероховатость поверхности образцов после ЛУП с фольгой, краской и лентой отличалась друг от друга незначительно. То же самое можно сказать и о микротвердости (рис. 1а). Что касается остаточных напряжений (рис. 1б), то их анализ показал, что наибольший эффект от упрочнения достигается при использовании в качестве поглощающего покрытия черной краски или алюминиевой фольги.

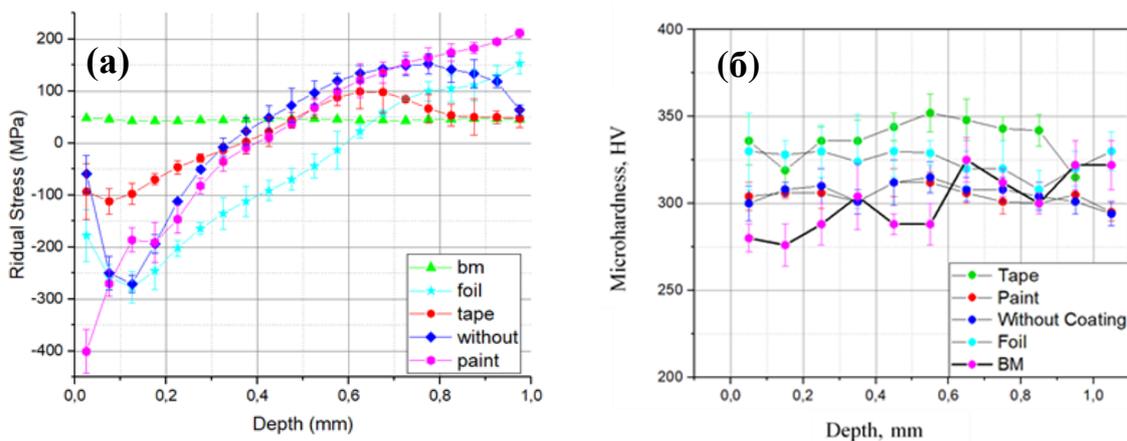


Рис. 1. Профили остаточных напряжений вдоль оси X (а), изменение микротвердости по глубине (б)



Подготовлено в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020-2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 21 апреля 2022 года № 075-15-2022-329)

Литература

- [1] Гачегова Е. А. и др. Влияние лазерной ударной проковки на мало-и многоцикловую усталость титанового сплава ОТ4-0 //Прикладная механика и техническая физика. – 2022. – Т. 63. – №. 2. – С. 182-191.
- [2] Clauer A. H. Laser shock peening, the path to production //Metals. – 2019. – Т. 9. – №. 6. – С. 626.
- [3] ГОСТ Р 71316-2024. Аддитивные технологии. Изделия, полученные методами аддитивных технологий. Определение остаточных напряжений методом сверления. М.: Российский институт стандартизации, 2024.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ И ЗАТУХАНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В МЕДИ ПРИ ЛАЗЕРНОМ УДАРНОМ УПРОЧНЕНИИ

Майер А.Е.¹, Вшивков А.Н.², Плехов О.А.², Манухина К.Д.², Родионов Е.С.¹, Майер П.Н.¹

¹Челябинский государственный университет, Челябинск

²Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, Пермь

kmanuhina15@gmail.com

В настоящее время лазерное ударное упрочнение (ЛУП) является широко используемой за рубежом технологией обработки [1] для улучшения механических характеристик и продления срока службы различных материалов и инструментов, включая лопатки турбин авиационных двигателей [2,3]. Механизм ЛУП включает в себя расширение плазменного слоя в области между обрабатываемой поверхностью и сдерживающей прозрачной средой, что повышает эффективность преобразования лазерной энергии в энергию ударной волны (УВ) по сравнению с облучением свободной поверхности металла. Генерируемая лазером УВ пластически деформирует облученный металл, создает остаточные напряжения сжатия и изменяет микроструктуру материала. Остаточные напряжения сжатия являются основным фактором повышения усталостного ресурса материала, поскольку они подавляют развитие трещин и, таким образом, предотвращают разрушение. Выбор правильного режима и алгоритма обработки является ключевым фактором эффективной реализации процесса ЛУП. Поэтому создание надежной численной модели процесса ЛУП имеет решающее значение для быстрой оптимизации и настройки технологического процесса.

В работе разработана и экспериментально подтверждена физически обоснованная модель ЛУП. Генерация ударной волны лазерным излучением учитывалась через нагрев и испарение поверхностного слоя меди, описываемого широкодиапазонным уравнением состояния. Структура и затухание ударной волны описываются моделью дислокационной пластичности. В экспериментальной части медные пластины трех различных толщин (0,5, 0,7 и 1,0 мм) облучались твердотельным лазером Nd:YAG с длиной волны 1064 нм продолжительностью 11 нс с плотностью мощности 6, 9, 12 и 18 ГВт/см², и с помощью фотонного доплеровского измерителя скорости (ФДИС) регистрировались скорости обратной свободной поверхности. Учет различной толщины пластин позволяет отделить эффекты генерации и затухания ударной волны и независимо проверить соответствующие части модели.

Рассчитанные значения давления на границе раздела, генерируемого лазером и вызывающего ударную волну, сравниваются с широко используемой моделью Фаббро [4]. Показано, что модель Фаббро недооценивает давление на границе раздела фаз, поскольку предполагаемое в этой модели стационарное расширение плазмы не реализуется для наносекундных лазерных импульсов. По нашим расчетам, давление на границе раздела фаз после достижения максимума снижается, несмотря на продолжение облучения, но не достигает значения, полученного с помощью формулы Фаббро. В результате существующие работы по моделированию, основанные на модели Фаббро, недооценивают уровень давления, но переоценивают длительность импульса давления, чтобы компенсировать это и получить соответствие эксперименту.



Разработка модели и численные исследования были профинансированы Российским научным фондом, проект № 24-19-00684, <https://rscf.ru/en/project/24-19-00684/>. Экспериментальная часть работы была выполнена в рамках реализации программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020-2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 21 апреля 2022 года № 075-15-2022-329).

Литература

- [1] Clauer A. H. Laser shock peening, the path to production - *Metals* 9, 626 (2019) <https://doi.org/10.3390/met9060626>.
- [2] See D. W., Dulaney J. L., Clauer A. H. and Tenaglia R. D. The air force manufacturing technology laser peening initiative - *Surf. Eng.* 18(1), 32–36 (2002). <https://doi.org/10.1179/026708401225001264>.
- [3] Dong X., Tang Z., Zhang G. and Wang K. Research on finite element simulation and recrystallization of laser shock peened nickel-based single-crystal superalloy - *J. Mater. Eng. Perform.* (2023). <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08823-3>.
- [4] Fabbro R., Fournier J., Ballard P., Devaux D. and Virmont J. Physical study of laser produced plasma in confined geometry - *J. Appl. Phys.* 68(2), 775 (1990). <http://dx.doi.org/10.1063/1.346783>.

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ПРОФИЛЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ДВУХСТОРОННЕМ СИММЕТРИЧНОМ ЛАЗЕРНОМ УДАРНОМ УПРОЧНЕНИИ

М.Л. Бартоломей¹, А.Ю. Изюмова¹, Е.А. Гачегова¹, А.Н. Вшивков¹, О.А. Плехов¹

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь,
bartolomei.m@icmm.ru

Применение технологии лазерного ударного упрочнения позволяет создавать остаточные напряжения в приповерхностной зоне конструкций из металлов и сплавов на глубину более 1 мм. Данная технология приводит к значительному улучшению механических свойств и повышает усталостную долговечность изделий. Однако при применении данной технологии для изделий с достаточно малой толщиной, например, как кромки лопаток турбин, необходимо подобрать такие параметры воздействия лазерного импульса, которые бы не вызывали необратимых деформаций и изменения формы конструкции. В данной работе описывается процесс численного моделирования лазерного ударного упрочнения и выбор параметров обработки для формирования зоны сжимающих остаточных напряжений на кромке лопатки, толщина которой менее 1 мм.

Контроль импульса давления, формируемого лазером, осуществлялся с помощью фотонного доплеровского измерителя скорости (ФДИС), позволяющего измерять скорость свободной поверхности мишени (обрабатываемой детали) в диапазоне от 5 м/с до 1380 м/с и с точностью до 2 м/с. С использованием ФДИС проведено измерение скорости свободной поверхности образцов из титанового сплава ВТ6 при воздействии лазерного импульса. В результате измерений была получена форма импульса, которая задавалась в качестве граничного условия при численном решении задачи определения остаточных напряжений в материале.

Для моделирования распространения упруго-пластических волн использовались определяющие соотношения Джонсона-Кука, которые широко распространены для описания деформирования металлов при высоких скоростях нагружения. На следующем шаге проводился статический расчет распределения остаточных напряжений с учетом полей пластических деформаций, созданных на предыдущем этапе. Анализ результатов численного моделирования показал, что для получения сжимающего поля остаточных напряжений при обработке деталей толщиной менее 1 мм эффективно использовать двухстороннее симметричное лазерное упрочнение. Такой способ обработки позволяет избежать изгиба изделий (деталей) малой толщины, а также избежать образования растягивающих напряжений в обрабатываемой зоне. По результатам численных расчетов подобран режим упрочнения (мощность, форма пятна, количество проходов, перекрытие), который позволяет сформировать сжимающее поле остаточных напряжений по всей толщине изделия в зоне обработки.

Подготовлено в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020-2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 21 апреля 2022 года № 075-15-2022-329)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ MoS₂-ZrN ТРИБОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Буковский П.О.¹, Щербакова О.О.¹, Муравьева Т.И.¹

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
bukovskiy@ipmnet.ru, shcherbakovaoo@mail.ru, muravyeva@list.ru

Твердые смазочные материалы широко используются в трибологических системах, в первую очередь в механических компонентах, работающих в условиях низкого давления и высокой температуры, таких как шестерни, шарикоподшипники, контактные кольца, точечные подшипники и т. д. [1]. Одним из наиболее часто используемых твердых смазочных материалов является MoS₂ [2]. Его широко используют в парах трения для минимизации износа и рассеивания энергии.

В работе, чтобы улучшить свойства покрытий MoS₂ и расширить область применения MoS₂, были получены композитные покрытия MoS₂-ZrN с добавлением 10% и 30% ZrN методом магнетронного распыления. Эти покрытия были нанесены на подложки из высококоррозионностойкой подшипниковой стали AMS 5898. Трибологические свойства покрытий были изучены с использованием трибометра MFT-5000 (RTEC, USA) по схеме «шарик - диск». В качестве контртел использовались шарики из стали ШХ15 с различной шероховатостью поверхности Sa (10, 25 и 70 нм) и керамики на основе нитрида кремния (с шероховатостью Sa=15 нм). Для изучения морфологии поверхности после трибологических испытаний было проведено исследование покрытий с использованием сканирующего электронного микроскопа Quanta-650 (FEI, США).

Результаты эксперимента показывали, что увеличение шероховатости стального шарика приводит к повышению коэффициента трения. Стоит отметить, что чем больше шероховатость контртела, тем меньше времени требуется для этапа приработки. Наименьший коэффициент трения наблюдается в парах, испытанных со стальным шариком с низкой шероховатостью (10 нм) и керамическим шариком ($\mu = 0,13$ и $0,09$ соответственно).

В качестве примера, на рисунке 1 показаны СЭМ-изображение следов износа на поверхности покрытия MoS₂+30%ZrN после контакта с различными контртелами.

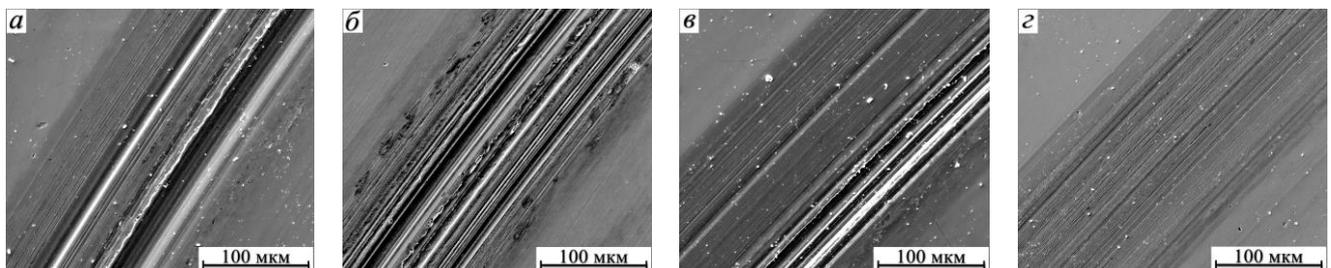


Рис. 1. СЭМ – изображение следов износа на покрытии MoS₂+30%ZrN после трибологических испытаний, проведенных с различными контртелами: где стальной шарик ШХ15 с шероховатостью 10 нм (а), 25 нм (б) и 70 нм (в); керамический шарик Si₃N₄ с шероховатостью 15 нм (г).

Из рисунка 1 видно, что при испытании с контртелами, имеющими наименьшую шероховатость, в частности стальным шариком с шероховатостью 10 нм (Рис. 1 а) и керамическим шариком с шероховатостью 15 нм (Рис. 1 г) на поверхности образуются дорожки трения, которые имеют менее поврежденный характер. И наоборот, с увеличением шероховатости шарика на дорожках трения становятся более выражены следы абразивного износа. На поверхности покрытия в паре с 30% ZrN и стальными шариками наблюдаются множественные трещины, сколы и глубокие изломы, распространяющиеся до стальной подложки. Анализ процесса износа показывает, что основными механизмами износа покрытия являются абразивное истирание и контактно-усталостное выкрашивание.

Полученные в работе результаты могут внести вклад в разработку и улучшение эксплуатационных характеристик твердосмазочных покрытий на основе MoS₂.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ Грант № 22-49-02010.

Литература

- [1] Mukhtar, Sheikh Haris, et al. Advances in development of solid lubricating MoS₂ coatings for space applications: A review of modeling and experimental approaches. *Tribology International* (2023): 109194.
- [2] Mufti, Taseer Anwar, et al. Development, mechanical characterization and high temperature tribological evaluation of magnetron sputtered novel MoS₂-CaF₂-Ag coating for aerospace applications. *Tribology International* (2023): 108374.

ОБ ОДНОМ ИЗ ПУТЕЙ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕТЕРОСТРУКТУР LiNbO_3/Si ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПАВ

Широков В.Б.^{1,2}, Турчин А.С.¹, Михайлова И.Б.¹, Калинин В.В.¹

¹Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону

²Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону
shirokov@ssc-ras.ru, vkalin415@mail.ru

Интерес к поверхностным акустическим волнам (ПАВ) определяется тем, что они играют ключевую роль при создании акустоэлектронных приборов и устройств различного назначения [1]. Элементы на ПАВ активно применяются в интегральных устройствах микроэлектроники (фильтры, резонаторы, линии задержки, микроэлектромеханические системы (МЭМС), сенсоры, акустооптические системы). В качестве активного элемента для возбуждения ПАВ наиболее часто используются различные срезы одного из наиболее распространенных монокристаллов – сегнетоэлектрика ниобата лития. Уменьшение размеров микроэлектронных устройств приводит к необходимости использовать в качестве активных элементов тонкие пленки. Высокотемпературные методы нанесения пленок приводят, из-за различия коэффициентов теплового расширения в системе «пленка-подложка», к большим деформациям и полидоменности пленок. Недавно появились методы переноса тонких монокристаллических пластинок ниобата лития [2- 4] на подложки при низких температурах. Это позволяет целенаправленно ориентировать пластинки ниобата лития для использования направлений наиболее эффективного возбуждения ПАВ. В данной работе исследуется процесс возбуждения акустических волн на поверхности сегнетоэлектрической гетероструктуры, представляющей собой пластину ниобата лития промышленных срезов, толщиной 1000нм, нанесенной на подложку (001) среза монокристаллического кремния. В качестве объекта исследования рассматриваются вертикально поляризованные волны (рэлеевкие волны) и сдвиговые горизонтально поляризованные волны. В качестве параметра, характеризующего эффективность возбуждения поверхностны акустических волн, используется коэффициент электромеханической связи (КЭМС). При исследовании эффективности возбуждения ПАВ в сегнетоэлектрической гетероструктуре рассмотрены пластины ниобата лития различных срезов. Пластина Z- среза имеет естественные координаты для группы симметрии C_{3v} ; нормаль к поверхности среза направлена вдоль тригональной оси, X- срез – нормаль к поверхности ориентирована вдоль кристаллографической x-оси исходного кристалла; Y- срез - нормаль к поверхности пластинки ориентирована вдоль кристаллографической y-оси исходного кристалла. Детально исследована эффективность возбуждения ПАВ на 41 Y- срезе, 64Y- срезе, 128Y- срезе и 153Y- срезе, нормаль поверхности которых ориентирована вдоль y-оси, повернутой вокруг кристаллографической оси x исходного кристалла на угол 41, 64, 128 и 153 градуса соответственно. Задача о возбуждения ПАВ на поверхности сегнетоэлектрической гетероструктуры, представляющей собой пьезоэлектрическую пластину, лежащую на диэлектрической подложке описывается уравнениями

$$\rho \frac{\partial^2 u_l}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{lm}}{\partial x_m}, \quad \frac{\partial D_m}{\partial x_m} = 0 \quad (1)$$

где $l, m=1, 2, 3$, u_l - смещения вдоль координатных осей x_1, x_2 и x_3 соответственно, σ_{lm} – компоненты тензора напряжений, D_m – компоненты вектора индукции, ρ – плотность, t – время. Здесь и далее по повторяющимся индексам подразумевается суммирование. Уравнения пьезоэффекта представляются выражениями

$$\sigma_{ik} = c_{iklm}^E S_{lm} + e_{ikm} \frac{\partial \varphi}{\partial x_m}, \quad D_i = e_{ikm}^E S_{km} - \varepsilon_{im}^S \frac{\partial \varphi}{\partial x_m} \quad (3)$$

$i, k, l, m=1,2,3$. В формулах (3) участвуют: φ – электрический потенциал, e_{ikm} – электроупругие коэффициенты, ε_{im}^S – диэлектрическая проницаемость при постоянной деформации, c_{iklm}^E – упругие коэффициенты при постоянном электрическом поле. При изменении ориентации пластины от системы xuz к системе $x'y'z'$ имеют место формулы

$$c'_{iklm} = n_{i\alpha} n_{k\chi} n_{l\delta} n_{m\gamma} c_{\alpha\beta\delta\gamma}, \quad e'_{ikm} = n_{k\chi} n_{l\delta} n_{m\gamma} e_{\beta\delta\gamma}, \quad \varepsilon'_{lm} = n_{l\delta} n_{m\gamma} \varepsilon_{\delta\gamma} \quad (4)$$

где c'_{iklm} , e'_{ikm} и ε'_{lm} материальные константы в повернутой системе координат, n_{ik} – косинусы углов между соответствующими осями. Исследование возбуждения ПАВ на гетероструктуре «пластинка ниобата лития – подложка кремния» (1) – (3) показало существенную зависимость КЭМС от ориентации пластинки. Вычисления проведены для пластинки толщиной 1000 нм. Из всех промышленных типов срезов пластинок ниобата лития на данной гетероструктуре наиболее эффективными для возбуждения волн Лява оказываются X-, Y- и 128Y- срезы, на которых КЭМС достигает значений 0.4, 0.38 и 0.39 соответственно. Как следует из результатов расчетов КЭМС для 128Y-среза больше, чем для Y-среза. Возможность увеличения КЭМС для других углов была проверена путем вычисления угловой зависимости КЭМС при повороте вокруг оси x (β -угол Эйлера). Здесь угол β соответствует срезу с углом - β , то есть, когда нормаль к поверхности пластинки представляет собой ось y , повернутую на угол $90+\beta$. Крайнее левое значение угла $\beta=-90$, соответствует пластинке Y-среза. Здесь КЭМС для волны Лява равен 0.38, как и для крайней правой стороны при $\beta=90$. По мере увеличения угла КЭМС сдвиговой волны уменьшается, достигая практически нулевого значения при угле -32° , затем вновь увеличивается. При угле равном 63° КЭМС достигает значения 0.43, затем опять начинает снижаться.

На всех типах срезов ниобата лития КЭМС волны Лява достигает более высоких значений по сравнению с рэлеевскими волнами. Полученные результаты представляют возможность выбора типа гетероструктуры с данной геометрией при создании устройств на ПАВ.

Работа выполнена в рамках реализации госзадания Южного научного центра РАН (номер гос. регистрации 122020100343-4).

Литература

- [1] Zhang S., Lu R., Zhou H., Link S., Yang Y., Li Z., Huang K., Ou X., and Gong S. Surface Acoustic Wave Devices Using Lithium Niobate on Silicon Carbide – IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques – 2020. 68(9), 3653-3666.
- [2]. Jia, L. Wang, and F.Chen Ion-cut lithium niobate on insulator technology: Recent advances and perspectives. Appl. Phys. 2021. 8, 011307.
- [3] Murakami S., Watanabe K., and Takigawa R. Investigation of the interface between LiNbO3 and Si fabricated via room temperature bonding method using activated Si nano layer – Japanese Journal of Applied Physics – 2023. 62, SG1041 (1-5).



[4 Wu S., Wu Z., Qian H., Bao F., Xu F., Zou J., and Tang G. A High-Performance NS-SAW Resonator Using 30° YX-Lithium Niobate,” in 2022 Jt. Conf. Eur. Freq. Time Forum IEEE Int.Freq. Control Symp. IEEE, 2022, 1–4.

СНИЖЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ НА КРИВОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКАХ ПОВЕРХНОСТИ

Бондарчук Д.А.¹, Федулов Б.Н.¹, Ломакин Е.В.¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва
bondarchuk.da@gmail.com, fedulov.b@mail.ru, evlomakin@yandex.ru

Для аэрокосмических изделий характерно наличие криволинейных протяженных поверхностей, множества скруглений, а также наклонных ребер. Общей проблемой при формировании авиационных композитных изделий, в частности, имеющих геометрию двойной кривизны, является образование такого дефекта, как волнистость.

В работе решалась задача оценки влияния величины радиуса оснастки на величину волнистости волокна и модуля Юнга (при сжатии) композитного изделия, имеющего начальную волнистость в процессе формирования на оснастке и в последующем одноосном сжатии формованного образца. Рассматривалась начальная волнистость 0.5° , 1.5° , 3° . Исследование проводилось посредством конечно-элементного моделирования с использованием осреднения, основанного на периодических граничных условиях. В качестве объекта моделирования был взят распространенный в инженерных конструкциях «уголок» из композита AS4/8552. Объект моделирования и схема укладки приведены на Рисунке 1.

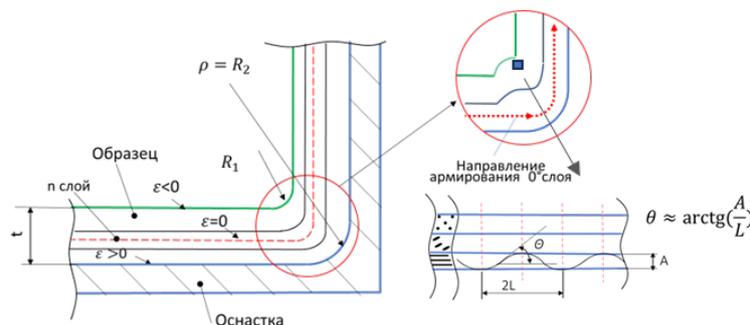


Рис. 1. Объект моделирования

Радиус скругления R_2 выбран исходя из условия нахождения уровня максимальных деформаций сжатий при формовке в интервале 0.01-0.06, а также близости к значениям конструктивно-подобных образцов [1]. Для простоты анализа принималось, что все слои имеют ориентацию 0° . Укладка на оснастку принималась послойной. Под волнистостью понималось отклонение волокон от прямолинейности. На первом шаге анализа моделировалась укладка не отверждённого образца, на втором шаге моделировалось одноосное сжатие отвержденного образца до 2% деформаций. Смена модуля связующего осуществлялось скачкообразно. При моделировании учитывались возникающие остаточные напряжения, возникающие в процессе отверждения. Рассматриваемые образцы представлены в Таблице 1.

На Рисунке 2А представлено изменение начального угла волнистости для рассматриваемых образцов (слоев «уголка») после выкладки на оснастку и после последующего одноосного сжатия формованного изделия до 2 % деформаций. На Рисунке 2Б приведен модуль Юнга, определенный при одноосном сжатии в направлении армирования формованного «уголка» для рассматриваемых образцов. Модуль определялся согласно стандарту [2].

Таблица 1. Рассматриваемые образцы

Наименование образца	Начальная волнистость	Деформации сжатия при укладке на оснастку	Деформации при последующем одноосном сжатии
Образец 1	$\Theta_{нач} = 0.5^\circ$	$\epsilon_1 = 0$	$\epsilon_2 = 0.02$
Образец 2	$\Theta_{нач} = 1.5^\circ$	$\epsilon_1 = 0$	$\epsilon_2 = 0.02$
Образец 3	$\Theta_{нач} = 3^\circ$	$\epsilon_1 = 0$	$\epsilon_2 = 0.02$
Образец 4	$\Theta_{нач} = 0.5^\circ$	$\epsilon_1 = 0.01$	$\epsilon_2 = 0.02$
Образец 5	$\Theta_{нач} = 1.5^\circ$	$\epsilon_1 = 0.01$	$\epsilon_2 = 0.02$
Образец 6	$\Theta_{нач} = 3^\circ$	$\epsilon_1 = 0.01$	$\epsilon_2 = 0.02$
Образец 7	$\Theta_{нач} = 0.5^\circ$	$\epsilon_1 = 0.02$	$\epsilon_2 = 0.02$
Образец 8	$\Theta_{нач} = 1.5^\circ$	$\epsilon_1 = 0.02$	$\epsilon_2 = 0.02$
Образец 9	$\Theta_{нач} = 3^\circ$	$\epsilon_1 = 0.02$	$\epsilon_2 = 0.02$

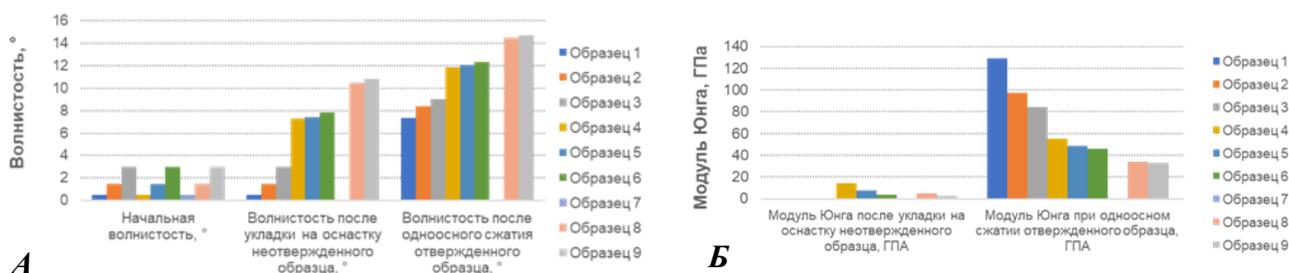


Рис. 2. **А**-Изменение начальной волнистости после выкладки на оснастку и после последующего одноосного сжатия образцов, **Б**- Модуль Юнга после одноосного сжатия формованных образцов.

На основании результатов моделирования можно сделать вывод, что волнистость с увеличением номера слоя, толщины и с уменьшением внутреннего радиуса слоя возрастает. Максимальная волнистость в рассматриваемых образцах по сравнению с начальной волнистостью в препреге увеличилась после укладки на криволинейную оснастку более чем на 10° . После одноосного сжатия в направлении армирования формованного образца максимальная волнистость возрастает до 15° . В процессе одноосного сжатия формованного образца (на оснастке, имеющей кривизну) наблюдается резкое падение жесткости по толщине. Для исследуемых образцов максимальное падение жесткости по сравнению с жесткостью на сжатие для композита с прямолинейным волокном произошло почти в 3 раза. Таким образом, наличие зон с волнистостью волокна, а именно изменение механических свойств материала в данных зонах должны быть приняты во внимание при проектировании изделий, имеющих криволинейные участки геометрии, в особенности для случая толстостенных конструкций.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 20-11-20230.

Литература

- [1].Hallander, P., Akermo, M., Mattei, C., Petersson, M., & Nyman, T. (2013). An experimental study of mechanisms behind wrinkle development during forming of composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 50, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.03.013>.
- [2].ASTM Standards, “ASTM D3410/D3410-M-(2003): Standard test method for compressive properties of polymer matrix composite materials with unsupported gage section by shear loading,” ASTM International, West Conshohocken, PA, USA (2003). https://doi.org/10.1520/D3410_D3410M-16.

МОДЕЛИ ОТВЕРЖДЕНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ФОТОПОЛИМЕРНОГО, РЕАКТОПЛАСТЧНОГО И ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО СВЯЗУЮЩЕГО

Федулов Б.Н., Бондарчук Д.А., Ломакин Е.В., Федоренко А.Н.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

fedulov.b@mail.ru

Для достоверного моделирования деформирования композитного материала, в общем случае приходится учитывать весь процесс его создания. Помимо искажения ориентации армируемых волокон при укладке неотверждённых преформ композита, ключевой проблемой является возможное коробление изделия. Такое деформирование связано с технологическим циклом изготовления и непосредственно с усадкой полимерного связующего во время его отверждения. Для различных типов полимеров приняты разные подходы к моделированию процесса их полимеризации, кристаллизации, конверсии и т.д. Тем не менее, все эти параметры являются в каком-то смысле мерой завершенности реакции и соответственно связываются с одной стороны с жесткостью материала, с другой, с его химической усадкой. Моделирование таких реакций позволяет спрогнозировать появление и распределение остаточных напряжений, что в свою очередь влияет на коробление изделия.

Более того, к параметрам степени отверждения можно привязать характеристики жесткости и прочности материала. Такой подход позволяет учесть распределение не только остаточных напряжений в проектируемом изделии, но и учесть неравномерности распределения механических свойств материала. На рисунке 1 показаны различные кривые деформирования для различных величин степени кристалличности (X_{vc}) в термопластичном материале (ПЭЭК). Видно повышение жесткостных и прочностных свойств с ростом степени кристалличности и падение значений предельной деформации растяжения.

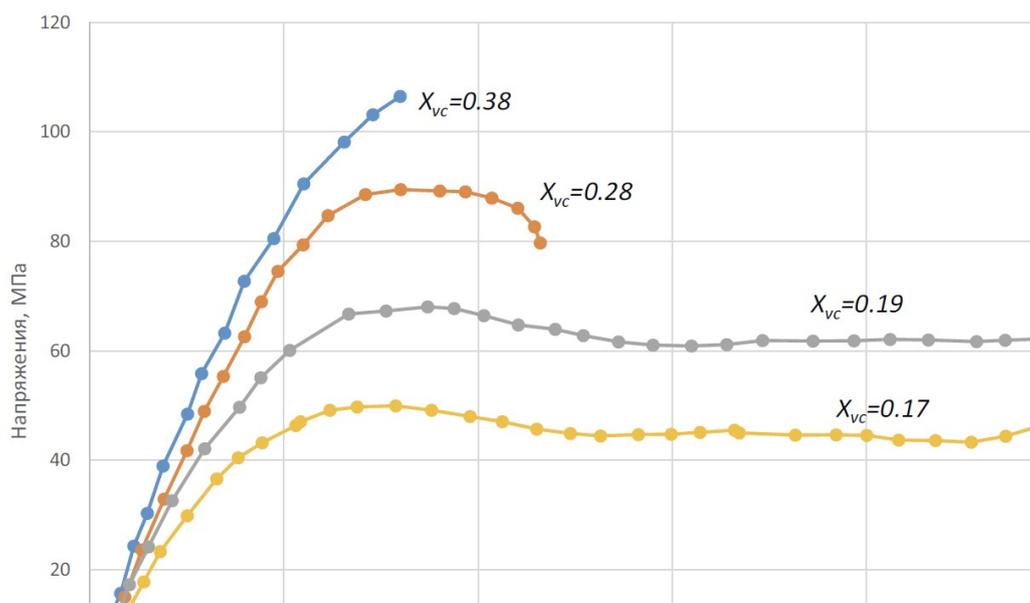


Рис. 1 Диаграммы деформирования ПЭЭК полимера при различных величинах степени кристалличности (X_{vc}) [1]

На рисунке 2 показаны результаты моделирования растяжения слоистого композита с укладкой $0^0/90^0$ с учетом остаточных напряжений в слоях материала и без него [2,3]. Результаты представлены в виде сечения образца, где в качестве заливки используется значение параметра поврежденности; величина 1 соответствует неповрежденному материалу, а 0 – полностью разрушенному. Характерные циклические повреждения в слоях с ориентацией 90^0 (волокна ориентированы по нормали к рисунку; слои 2, 4, 6 и т.д.) являются продольными трещинами для образца. При этом при отсутствии остаточных напряжений происходит плавная равномерная деградация жесткости.

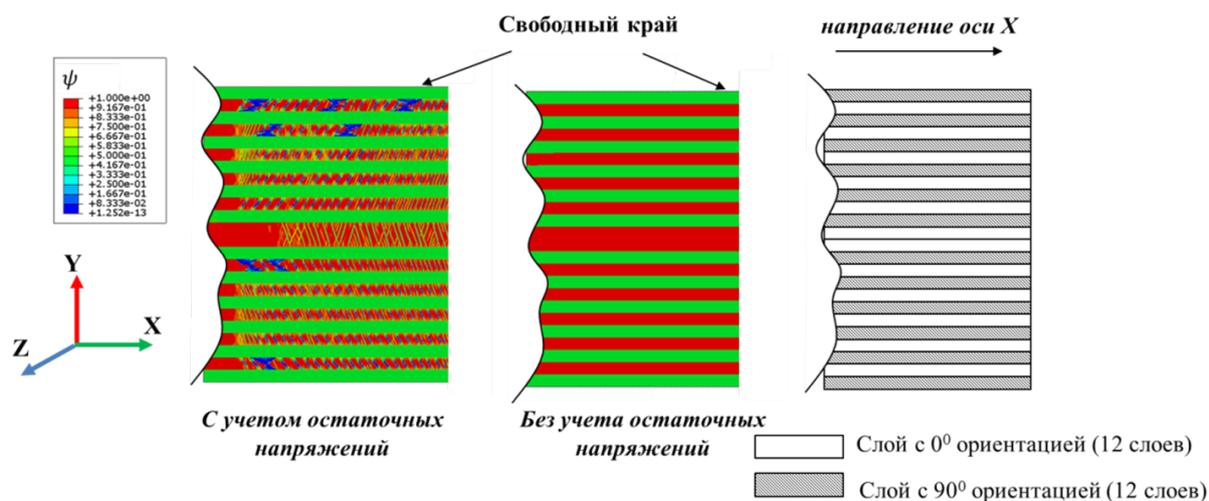


Рис. 2. Распределение повреждений связующего в композите при растяжении с учетом технологических напряжений (слева) и без него (центр). Укладка композита (справа) [2].

В работе рассматриваются различные модели отверждения полимеров, приводится сравнительный анализ с некоторыми примерами технологического моделирования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 20-11-20230.

Литература

- [1]. Gao S. L., Kim J. K. Cooling rate influences in carbon fibre/PEEK composites. Part 1. Crystallinity and interface adhesion //Composites Part A: Applied science and manufacturing. – 2000. – Т. 31. – №. 6.– С. 517-530.
- [2]. Fedulov B. N. et al. Residual stresses near the free edge of composite materials //Acta Mechanica. – 2022. – Т. 233. – №. 2. – С. 417-435.
- [3]. Бондарчук Д. А. и др. Анализ остаточных напряжений в слоистых композитах на примере симметричной схемы армирования $[0^0/90^0]$ //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – №. 3. – С. 17-26.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ АУКСЕТИКОВ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Тарасова А.С.¹, Ташкинов М.А.¹

¹Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет, Пермь
a.tarasova@pstu.ru

Механические метаматериалы — это класс структур, демонстрирующий свойства, которые не наблюдаются в природных материалах. Один из примеров таких необычных свойств - отрицательный коэффициент Пуассона. Такие материалы называются ауксетичными, и их уникальное поведение достигается за счет структурного строения. Благодаря своим уникальным свойствам ауксетичные материалы обладают рядом преимуществ, среди которых: высокая ударная прочность, повышенная сопротивляемость сдвигу, вдавливанию и разрушению. Ауксетичные структуры применяются в различных областях, включая: автомобилестроение, авиация, спорт и биомедицина.

Одним из способов организации ауксетичной структуры является использование ячейки с повторно-входящим углом, которая состоит из двух горизонтальных и четырех наклонных составляющих, а также шести узлов: так называемые внешние четыре узла, соединяют горизонтальные и наклонные элементы ячейки, а два внутренних соединяют между собой наклонные стойки. Для создания трехмерной модели этой ячейки использовались простые геометрические фигуры: цилиндры для стоек и сферы для шарниров, которые обеспечивают плавные переходы между элементами (см. рис. 1 (а)). Транслируя эту ячейку вдоль осей X и Y, получаем ауксетичную решетку (см. рис. 1 (б)). Количество ячеек в каждом направлении можно контролировать, а также добавлять ауксетичные слои вдоль оси Z с заданным расстоянием между ними [1]. Используя программный пакет Wolfram Mathematica, полученная решетка из параллелепипеда преобразуется в цилиндр. Специальный алгоритм определяет координаты каждой ячейки и порядок их соединения, позволяя создавать цилиндры с различным числом ячеек по окружности, рядов в радиальном направлении, окружностей вдоль оси Z, а также толщиной элементов (см. рис. 1г). Эти параметры можно изменять для создания ауксетичных цилиндров с разными характеристиками.

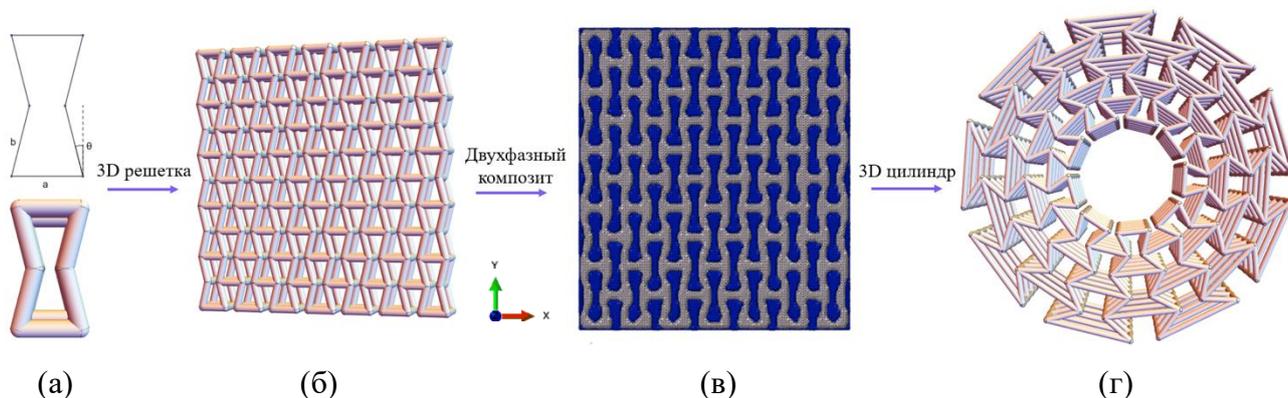


Рис.1. (а) повторно-входящая ячейка ауксетика, (б) ауксетичная решетка, (в) ауксетичный композит, (г) ауксетичный цилиндр

В данной работе анализировались свойства ауксетичного цилиндра (см. рис. 2а) и эффективного цилиндра с ауксетичными свойствами, которые были получены после численных расчетов двухфазного композита (свойства второй фазы близки к нулю) (см. рис. 2

(б). Для исследования механического поведения ауксетичного цилиндра были разработаны трехмерные конечно-элементные модели. Граничные условия были приложены на внутреннюю или внешнюю поверхность цилиндров.

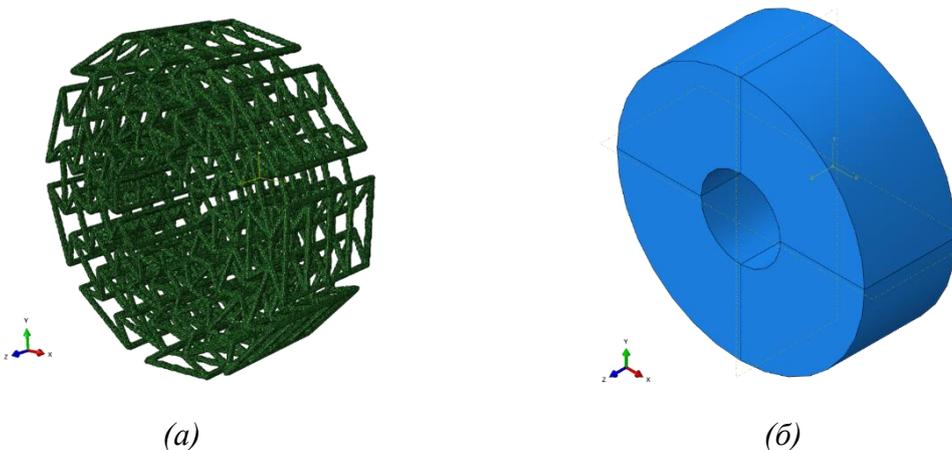


Рис. 2. (а) Ауксетичный и (б) эффективный цилиндры

Исследовано поведение ауксетичного цилиндра и случай полого цилиндра с эффективными свойствами при температурном воздействии, при внутреннем или внешнем давлении, а также при сложном виде нагружения – температура вместе с приложенным давлением, с вариацией КТР и типа граничных условий. Также был рассмотрен случай исследования механического отклика эффективного цилиндра в сравнении с оригинальным ауксетичным цилиндром. Выполнено сравнение механических характеристик цилиндров при одинаковых условиях нагружения и граничных условиях. Построены графики зависимостей, иллюстрирующие степень расширения или сужения толщины цилиндров в зависимости от коэффициента теплового расширения.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете в рамках Федеральной программы академического лидерства "Приоритет-2030".

Литература

[1] M. Tashkinov, A. Tarasova, I. Vindokurov, and V. V. Silberschmidt, "Composites with Re-Entrant Lattice: Effect of Filler on Auxetic Behaviour," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 20, 2023, doi: 10.3390/polym15204076.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА PLA ПРИ СЖАТИИ

Виндокуров И.В.¹, Ташкинов М.А.¹

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
IVV@pstu.ru, M.Tashkinov@pstu.ru

Одним из стремительно развивающихся направлений использования аддитивных технологий является производство протезов, имплантатов и других биомедицинских устройств из биосовместимых полимеров. Полилактид (PLA) часто применяется в биомедицине, особенно в тканевой инженерии, где он используется для восстановления или замещения поврежденных тканей с помощью искусственных скаффолдов. Для таких применений необходимы оптимальные структурно-механические характеристики, которые можно достичь путем тщательного подбора параметров аддитивного производства. При этом, важным аспектом является точность воспроизведения мелких деталей. Для этого необходимо исследовать влияние характерного размера образца на его механический отклик. Кроме того, на эффективные свойства материала влияет изменение плотности: пустоты и дефекты, возникающие в процессе изготовления, могут разрушаться под действием сжимающих нагрузок, что, в свою очередь, повышает плотность образца.

В рамках данного исследования были выявлены оптимальные параметры печати для образцов на сжатие из PLA, созданных по технологии послойного наплавления филамента (FFF). В частности, были изучены различные скорости нагружения на кубические образцы с концентрическим заполнением, различного размера [1]. Кроме того, особое внимание было уделено влиянию контактного трения на результаты экспериментов по сжатию образцов из PLA. При большем трении боковые смещения верхней грани образцов ограничиваются, что приводит к их бочкообразной деформации. В то же время, при меньшем трении верхняя поверхность может расширяться в поперечном направлении, обеспечивая более равномерное сжатие остальной части образца (рис.1).

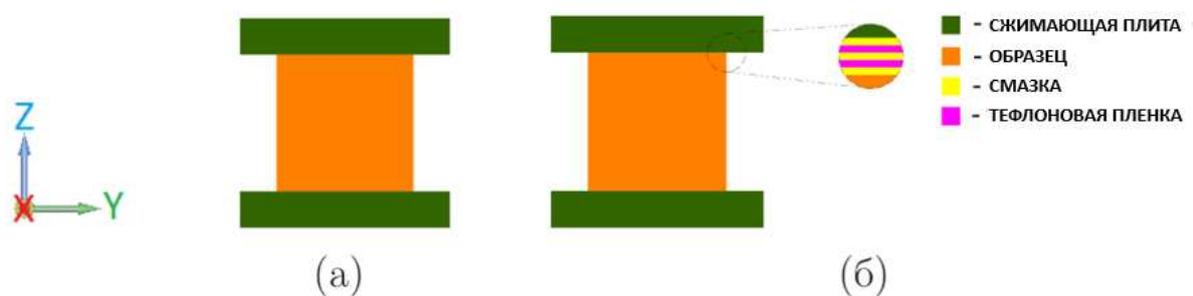


Рис. 1 Конфигурации образцов при сжатии с большим (а) и меньшим (б) коэффициентом трения

Помимо кубических образцов с концентрическим заполнением, были изготовлены два типа кубических образцов: 5 мм и 7,5 мм, с заполнением под углом 45°/-45°. Все они были испытаны при одинаковой скорости деформирования, чтобы исключить влияние размера на результаты. Затем были созданы прямоугольные образцы размером 15x5x5 мм с заполнением под углом 45°/-45° и скаффолды такого же размера и с таким же заполнением. Эти образцы были

испытаны при одинаковых скоростях нагружения. Кубические и прямоугольные образцы со скаффолдами были изготовлены в двух ориентациях: для определения свойств при перпендикулярном и параллельном приложении нагрузки при сжатии.

Было установлено, что условия контакта между образцом и нагрузочной плитой при сжатии существенно влияют на морфологию поверхности и механические свойства исследуемых образцов. Совместное воздействие сжимающей нагрузки и неоднородностей, созданных в процессе 3D-печати, позволило значительно снизить уровень повреждений. Было выявлено, что при одинаковых скоростях деформирования размер образца не имеет значения. Механические характеристики образцов остаются неизменными в пределах погрешности. Было обнаружено, что при одинаковых условиях печати, в случае испытаний с перпендикулярным и параллельным приложением нагрузки к слою в упругой зоне, можно говорить об изотропности. Однако всё, что находится за пределами упругой зоны, ведёт себя нелинейно при таких нагрузках. Кривые зависимости напряжений от деформаций для скаффолдов в целом повторяют зависимости для образцов со сплошным заполнением той же геометрической формы.

Литература

- [1] I. Vindokurov, Y. Pirogova, M. Tashkinov, and V. V. Silberschmidt, “Compression of additively manufactured PLA for biomedical applications: Effects of test conditions on properties of solid samples,” *Polym. Test.*, vol. 130, no. December 2023, p. 108320, 2024, doi: 10.1016/j.polymertesting.2023.108320.

МАКРОФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ ТУРБИННОГО ДИСКА ГТД

Грибов Д.С., Кондратьев Н.С., Шарифуллина Э.Р., Романов К.А., Балдин М.Н.,
Вшивкова А.А., Безверхий Д.С., Курмоярцева К.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
gribovds@pstu.ru

Повышение КПД газотурбинного двигателя (ГТД) требует развития технологий, позволяющих повысить способность конструкций сопротивляться высоким механическим нагрузкам и температурам. Сохранение прочностных характеристик деталей ГТД с одновременным уменьшением их массы – актуальная задача двигателестроительных компаний. Одним из перспективных решений является создание и применение высокожаропрочных сплавов с различным размером зерна, позволяющих достичь функционально-градиентных свойств в рамках единой конструкции [1, 2]. Градиентное распределение зерна в дисках газотурбинных двигателей из никелевых сплавов может иметь важное значение для обеспечения оптимальной производительности и долговечности таких двигателей [3, 4]. Оно положительно влияет на механические, термические и прочностные свойства материала, а также на его стабильность и устойчивость к различным воздействиям.

Объектом исследования является турбинный диск ГТД из сплава Inconel 718, на котором закреплены рабочие лопатки, позволяющие снимать мощность с потока газов, выходящего из камеры сгорания. Диски газовой турбины обычно работают при высоких температурах и вращаются с большими угловыми скоростями. Высокая угловая скорость создает поле центробежных сил, приводящее к растягивающим напряжениям в диске. Повышенные значения температуры в условиях эксплуатации могут приводить к неупругим деформациям в результате ползучести. Важнейшим требованием, предъявляемым к турбинным дискам ГТД, является обеспечение их длительной работы в повторяющихся условиях повышенных температур и инерционных нагрузок.

Для описания поведения материала сформулирована учитывающая размер зерна феноменологическая модель вязкоупругости, используемые в комплексе критерии статической и усталостной прочности. Сформулирована постановка краевой задачи для моделирования поведения диска в условиях эксплуатации, включающая решение задачи об определении распределенных температуры и напряженно-деформированного состояния изделия. С использованием метода конечных элементов (МКЭ) проведены расчёты типового режима работы диска, определены поля напряжений, деформаций и температур на модельном образце диска.

Для описания устойчивого функционирования диска применяется совокупность двух критериев прочности. Первый (усталостный) критерий [5] позволяет учесть поврежденность материала за счёт возможного накопления неупругих деформаций. При выполнении в одной из локальных частей диска критерия, материал в этой области считается разрушенным, деталь выходит из строя. Вторым критерий – статический, и применяется для подтверждения того, что ни одна область детали не подвергается пластическому деформированию.

Для задания градиента зерна по радиусу было предписано линейно увеличивающийся средний размер зерна от 30 мкм до 50 мкм (вблизи ступицы – меньше, вблизи обода – больше). Такое распределение позволяет достичь более высоких характеристик по

статической и усталостной прочности: вблизи ступицы повышается предел текучести, вблизи обода – трещиностойкость и сопротивление вязкому деформированию, способного привести к разрушению. Используя гипотезу о линейном накоплении поврежденности, и отнеся величину накопленных за цикл поврежденности к максимальным критическим вязким деформациям, можно оценить число полётных циклов до разрушения. Размер зерна существенно определяет предел текучести материала, для его определения используется закон Холла-Петча. Поле деформаций за счёт вязкого течения, существенно определяемого средним размером зерна в элементе диска, приведено на рис. 1.

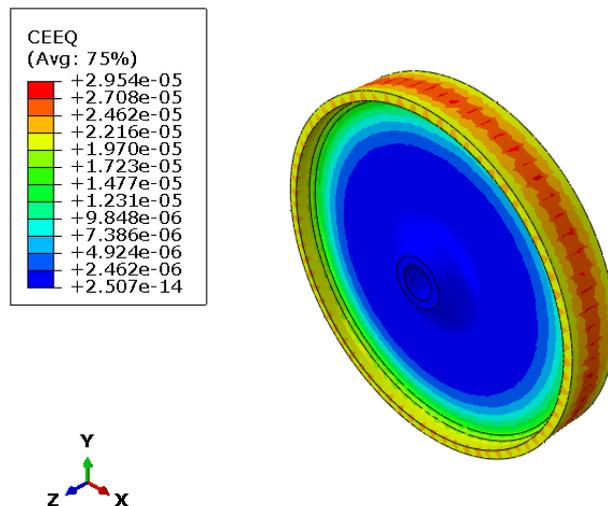


Рисунок 1. Поле накопленных за один цикл вязких деформаций

Для обоснования необходимости применения градиентного распределения размера зерна был проведён анализ результатов численных экспериментов в аналогичной постановке для дисков с однородным размером зёрен. Можно отметить, что диски с однородным размером зерна показали снижение как запаса статической прочности (на 4% для зёрен 50 мкм), так и снижение числа циклов до разрушения по кинематическому критерию (до 110 циклов для зёрен 30 мкм).

Работа выполнена в рамках развития Передовой инженерной школы «Высшая школа авиационного двигателестроения» ПНИПУ.

Литература

- [1] Гарибов Г.С. и др. Исследование возможности изготовления заготовок дисков ГТД с переменной структурой и функционально-градиентными свойствами из гранул разных фракций // Технология легких сплавов. 2011. – №4. – С. 41-49.
- [2] Братухин А.Г., Решетников Ю.Е., Иноземцев А.А. Основы создания газотурбинных двигателей для магистральных самолетов. М.: Авиатехинформ, 1999. – 271 с.
- [3] Попович В.А. и др. Формирование заданных свойств функционально-градиентного сплава Inconel 718 с использованием аддитивных технологий // Металловедение и термическая обработка металлов. 2018. – № 11. – С.14-22.
- [4] Ning Y. et al. Structural-gradient-materials produced by gradient temperature heat treatment for dual-property turbine disc // Journal of Alloys and Compounds. 2013. – Vol. 557. – P. 27-33.
- [5] Prasad K. et al. Simultaneous creep-fatigue damage accumulation of forged turbine disc of IN 718 superalloy // Materials Science and Engineering: A. 2013. – Vol. 572. – P. 1-7.

МЕТОД "ВЛОЖЕННЫХ ЦИКЛОВ" ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАПОЛНЕННЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ

Гаришин О.К.¹, Шадрин В.В.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
gar@icmm.ru

Исследовано механическое поведение эластомерных нанокompозитов в условиях конечных циклических деформаций. При этом использовалась программа "испытаний с вложенными циклами", разработанная в ИМСС УрО РАН специально для материалов данного класса [1]. Ее основное отличие от других известных методик в том, что образец подвергается одноосному циклическому нагружению с изменяющимися на каждом шаге амплитудой и скоростью деформирования. В начале и конце цикла (т.е. при минимальных и максимальных цикловых деформациях) захваты разрывной машины останавливаются на фиксированный промежуток времени для снятия соответствующих релаксационных зависимостей. Такой подход позволяет за один эксперимент получать информацию, как об упругих, так и вязких свойствах испытываемого материала.

Основным объектом экспериментальных исследований были эластомерные композиты на основе бутадиен-стирольного каучука. В качестве наполнителя использовались как моно- (только технический углерод (3D частицы)) так и бинарные наполнители (базовая часть из технического углерода плюс второй наполнитель из детонационных наноалмазов (3D), наночастиц малослойного графена (2D) или многостенных углеродных нанотрубок (1D)). Все образцы были изготовлены А.П. Возняковским и А.Ю. Неверовской в Научно-исследовательском институте синтетического каучука им. С.В. Лебедева (Санкт-Петербург). Ими же была разработана методика очистки углеродных нанотрубок от нежелательных примесей с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [2]. В работе использовались композиты, содержащие как исходные нанотрубки так и очищенные с помощью СВС.

На основе полученных экспериментальных данных строились две зависимости — деформационная (напряжения от деформации) и временная (напряжения от времени), а на их основе рассчитывались равновесные кривые нагружения. С их помощью были исследованы особенности механического поведения эластомерных нанокompозитов в зависимости от типа наполнителя (при одинаковой массовой концентрации) и скорости деформирования. В результате было установлено:

- 1) Сравнение деформационных зависимостей показало, что существенное увеличение максимальных циклических напряжений наблюдалось только для композитов, содержащих модифицированные с помощью СВС углеродные нанотрубки. В остальных случаях переход к бинарным наполнителям слабо не сказывался на их значениях.
- 2) Наибольшее увеличение равновесного начального модуля (жесткости материала) также происходило при вводе в эластомер наполнителей из углеродных нанотрубок (более чем в 3 раза). При использовании графена и наноалмазов этот рост был значительно ниже.
- 3) Для всех испытываемых материалов снижение скорости деформирования приводило к уменьшению диссипативных потерь. Было также установлено, что для уже размягченных



образцов цикловые потери при нагружении материала были примерно 1.5–2 раза больше чем при разгрузке, причем это соотношение слабо зависело от скорости деформирования.

4) Значительное превышение диссипативных потерь на первом цикле нагружения по сравнению с последующими (размягчение Маллинза) также наблюдалось у всех испытываемых материалов. На потери от размягчения приходилась примерно половина от их общей величины, причем для композитов с 3D и 2D наполнителями она было несколько выше, чем для углеродных нанотрубок.

5) Также было установлено, что остаточные деформации после циклических испытаний были невелики и в большинстве случаев их, в принципе, можно не учитывать при проектировании изделий из этих материалов.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ПФИЦ УрО РАН. Регистрационный номер: АААА-А20-120022590044-7.

Литература

[1] Свистков А.Л., Шадрин В.В. Способ одноосного циклического испытания материала / Патент № 2549841, зарегистрирован в ГРИПФ 2015.04.02.

[2] Возняковский А.П., Неверовская А.Ю., Меленевская Е.Ю., Чубарова Е.В., Кутин А.А., Суханова Т.Е. Особенности распределения одностенных углеродных нанотрубок в матрице полистирола // Нанотехнологии: наука и производство. – 2018. – N 4. – P. 64–72. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37256288>



УРАВНЕНИЯ СОВМЕЩНОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ ФЕРМ

Лалин В.В.^{1,2}, Ибрагимов Т.Р.¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

²Российский университет дружбы народов, Москва
vllalin@yandex.ru, timuribragimov.ra@gmail.com

В строительной механике существуют два основных метода расчета статически неопределимых стержневых систем: метод сил и метод перемещений. Известны классы задач, для решения которых выгодней применять тот или иной метод. Однако, в существующих программных комплексах по расчету строительных конструкций используется только один метод – метод перемещений. Это связано с тем, что в строительной механике до сих пор не сформулирован алгоритм метода сил, который по своим вычислительным свойствам и сложности программирования был сравним с алгоритмом метода перемещений.

С алгебраической точки зрения алгоритмизация метода сил требует построения общего решения однородных уравнений равновесия, т.е. – общего решения однородной системы линейных алгебраических уравнений, в которой число уравнений меньше числа неизвестных. Известные до сих пор попытки алгоритмизации метода сил требовали достаточно трудоемкого анализа матрицы уравнений равновесия [1-9]. Поэтому актуальной задачей остается разработка алгоритма расчета статически неопределимых систем без необходимости использования уравнений равновесия.

В докладе излагается новый алгоритм метода сил для расчета статически неопределимых ферм – шарнирных стержневых систем [10]. Этот алгоритм основан на прямом построении матрицы совместности деформаций. Требуемая для алгоритма метода сил матрица общего решения однородных уравнений равновесия получается простым транспонированием матрицы совместности деформаций. В результате удается сформулировать алгоритм метода сил, в котором вообще не требуется использовать уравнения равновесия. При этом структура матрицы разрешающей системы уравнений – матрицы податливости конструкции – становится однозначно определенной после нумерации контуров фермы.

Предложенный способ построения уравнений совместности деформаций связан с изменением площади контуров фермы. В докладе сначала в общем виде, а затем на конкретных примерах, построены матрицы совместности деформаций для нескольких видов статически неопределимых ферм.

Литература

- [1] Henderson J.C. Topological Aspects of Structural Linear Analysis // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. 1960. Vol. 5(32). Pp. 137 - 141. <http://doi.org/10.1108/eb033249>
- [2] Denke P.H. A general digital computer analysis of statically indeterminate structures. NASA Technical Note: NASA-TD-D-1666. December 1962. Режим доступа: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19630000927>. Дата обращения: 05.06.2024.



- [3] Przemieniecki J.S., Denke P.H. Joining of complex substructures by the matrix force method // Journal of Aircraft. 1966. Vol. 3(3). Pp. 236 - 243. <http://doi.org/10.2514/3.43731>
- [4] Patnaik S. An integrated force method for discrete analysis // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1973. Vol. 2(6). Pp. 237 - 251. <http://doi.org/10.1002/nme.1620060209>
- [5] Washizu K. Variational Methods in Elasticity and Plasticity - New York: Pergamon Press, 1974. - 432 p.
- [6] Розин Л.А. Стержневые системы как системы конечных элементов - Ленинград: Издательство ЛГУ, 1976. - 232 с.
- [7] Филин А.П. и др. Алгоритмы построения разрешающих уравнений механики стержневых систем – Ленинград: Стройиздат. 1983. – 232 с.
- [8] Шулькин Ю.Б. Теория упругих стержневых конструкций - Москва: Наука, 1984. - 272 с.
- [9] Kaveh A. Subminimal Cycle Bases for the Force Method of Structural Analysis. // Communications in Applied Numerical Methods. 1987. Vol. 4(3). Pp. 277 - 280. <http://doi.org/10.1002/cnm.1630030407>
- [10] Ибрагимов Т.Р., Лалин В.В. Алгоритм построения общего решения уравнений равновесия в статически неопределимых фермах // Инженерные исследования. 2024. №1(16). С. 30 - 36. <http://eng-res.ru>

ОБЛАСТИ ПРИТЯЖЕНИЯ В ЗАДАЧЕ МАЯТНИКА КАПИЦЫ С ВНУТРЕННИМИ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Беляев А.К.¹, Полякова О.Р.², Товстик Т.П.¹

¹Институт Проблем Машиноведения РАН, Санкт-Петербург

²Общественная организация научных исследований «Метагалактические Науки»
Московской области, Подольск

vice.ipme@gmail.com, ksempolyaor@yandex.ru, tovstik_t@mail.ru

Известное явление устойчивости перевернутого маятника под действием вертикальной вибрации его основания, исследованное П.Л. Капицей [1], находит всё больше применений в технике и технологиях. Расчёты и эксперименты показывают, что учёт влияния сжимаемости модели маятника (см. рис. 1) может существенно изменить результат его устойчивости, в том числе увеличить область, в которой находится амплитуда угла отклонения маятника в устойчивом режиме [2], [3].

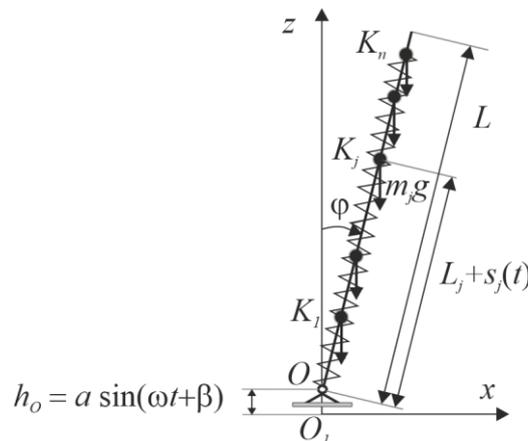


Рис. 1. Модель сжимаемого в продольном направлении маятника Капицы.

В настоящей работе методом асимптотического осреднения [4] получено осреднённое уравнение колебаний маятника около верхнего положения равновесия и условие устойчивости колебаний перевернутого маятника

$$\frac{d^2\varphi}{d\tau^2} + \frac{I_1}{I_2} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{I_1}{I_2} + \frac{\Delta}{I_1} \right) \cos\varphi - \frac{gL}{a^2\omega^2} \right) \sin\varphi = 0, \quad \frac{1}{2} \left(\frac{I_1}{I_2} + \frac{\Delta}{I_1} \right) \cos\varphi - \frac{gL}{a^2\omega^2} > 0. \quad (1)$$

Здесь a – амплитуда вертикальных колебаний основания маятника, L – длина маятника, величина a/L считается малой, g – ускорение свободного падения. Выражение для координаты точки основания маятника относительно неподвижной системы координат имеет вид $h_0 = a \sin(\omega t + \beta)$, где ω – частота колебаний основания маятника, t – время, β – начальная фаза. Асимптотически осреднённое значение угла φ отклонения маятника от вертикали, как функция медленного времени $\tau = (a/L)\omega t$, удовлетворяет уравнению (1).

Коэффициенты I_1 , I_2 зависят от распределения масс маятника в недеформированном состоянии и входят как множители при $\dot{\varphi}$ в выражения количества движения и момента

количества движения маятника относительно точки закрепления, соответственно, вычисленные без учёта вибрации основания. Коэффициент Δ является поправочным членом и зависит от амплитуды и формы вынужденных продольных колебаний масс маятника. Для маятника, изображённого на рисунке 1, коэффициенты имеют вид

$$I_1 = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^n L_j m_j, \quad I_2 = \frac{1}{L^2} \sum_{j=1}^n L_j^2 m_j, \quad \Delta = \sum_{j=1}^n m_j h_j, \quad (2)$$

где h_j – безразмерные коэффициенты в амплитудах малых вынужденных колебаний системы под действием заданных колебаний основания, когда маятник находится в вертикальном положении, то есть при $\varphi = 0$,

$$s_j(t) = h_j a \sin(\omega t + \beta), \quad (3)$$

где $s_j(t)$ – отклонение массы m_j вдоль оси маятника.

Величина Δ может как увеличивать возвращающий момент, действующий на отклонённый маятник, так и уменьшать его. Вблизи резонансов системы величина Δ увеличивается по модулю. Поправка Δ является положительной, увеличивающей устойчивость колебаний маятника в верхнем положении, если жёсткость пружин маятника немного превышает жёсткость, необходимую для наступления резонанса, в обратном случае поправка отрицательная и работает против устойчивости маятника. В случае, когда жёсткость пружин маятника выше всех резонансных значений, поправка для любых значений жёсткости является положительной. Поправка Δ стремится к нулю, при жёсткости, стремящейся к бесконечности.

Задача обобщается на случай континуального распределения масс маятника и на составную конструкцию маятника, включающую деформируемые в продольном направлении и недеформируемые элементы.

Литература

- [1] Капица П.Л. Маятник с вибрирующим подвесом // Успехи физических наук. 1951. Т. 44. № 1, С. 7–20.
- [2] ИПМаш РАН. Статьи Лабораторий. Маятник Стефенсона-Капицы с дополнительной степенью свободы <https://ipme.ru/184-majatnik-stefensona-kapicy-s-dopolnitelnoi-stepenyu-svobody.html> (дата 11.10.2024)
- [3] Belyaev A.K., Polyakova O.R., Tovstik T.P. The Effect of Longitudinal Oscillations Resonance on Stability and Domains of Attraction in the Generalized Kapitza Problem. In: Altenbach H., Mkhitaryan S.M., Hakobyan V., Sahakyan A.V. (eds) Solid Mechanics, Theory of Elasticity and Creep. Advanced Structured Materials. Springer, 2023. Vol 185. P. 93–100.
- [4] Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний – М.: ФИЗМАТЛИТ, 1958. – 408 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ В ПРОЦЕССЕ ЗАПРЕССОВКИ МОДЕЛЬНОГО СОСТАВА

Богданов Я.Д.¹, Донгаузер К.А.², Сметанников О.Ю.³

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

²АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь

³Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

bogdanov-yd@avid.ru, dongausser@avid.ru, sou2009@mail.ru

Одним из этапов изготовления отливок лопаток ГТД с внутренней полостью сложной топологии является процесс запрессовки модельного состава под давлением, зачастую сопровождающийся разрушением керамического стержня. Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) керамического стержня под действием давления от течения модельного состава проведен в программном комплексе ProCAST с использованием модуля Stress. Неньютоновское поведение модельного состава описывается реологической моделью Каро-Ясуда [1]. Поведение керамического стержня описывается упругопластической моделью с изотропным упрочнением.

В работе рассматривается модель восковой сопловой лопатки с каналами для подвода модельной массы, а также элементы пресс-формы, которые требуются для полной имитации закрепления керамического стержня внутри оснастки (рисунок 1). Начальный номинальный зазор между элементами пресс-формы, керамическим стержнем и моделью лопатки составляет 0.05 мм. Так как нас интересует поведение керамического стержня в процессе запрессовки, то деформируемым объектом является только он.

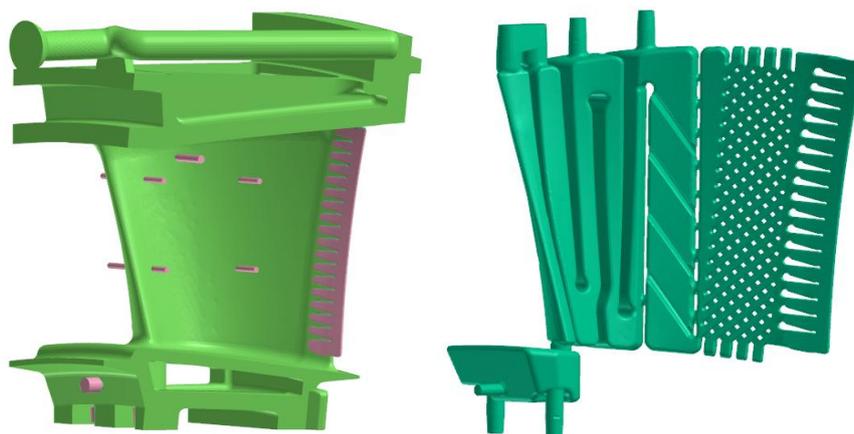


Рисунок 1 – Геометрическая восковая модель лопатки и керамического стержня

Режим прессования модельной массы в пресс-форму следующий: на вход полости между пресс-формой и стержнем подается воск при температуре 80 °С с равномерным (постоянным во времени) массовым расходом.

На рисунке 2, а показано распределение пластических деформаций в керамическом стержне в конце цикла прессования модельного состава.

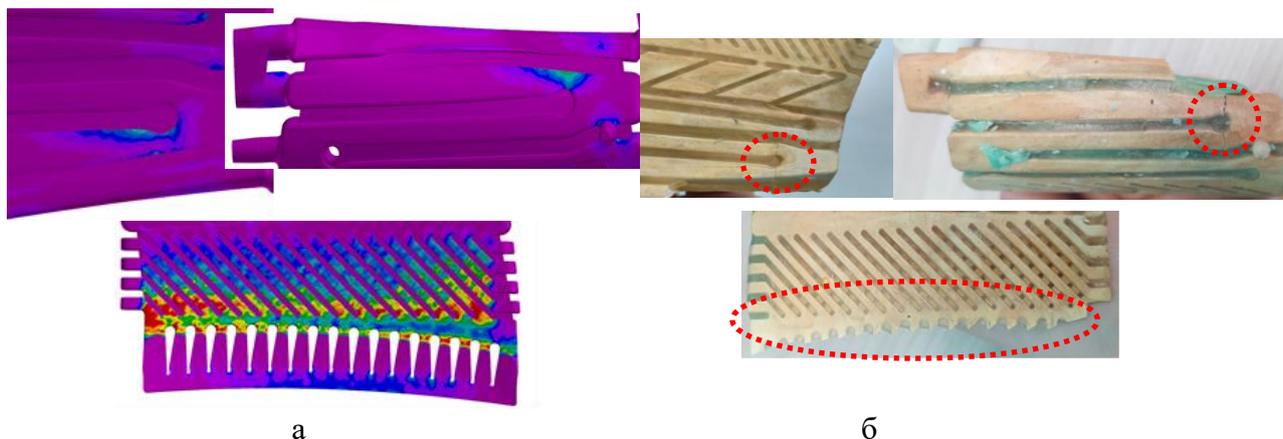


Рисунок 2 - Распределение расчетных пластических деформаций в керамическом стержне (а) и зон разрушения в натурном эксперименте (б)

Из рисунка 2, а видно, что на стержне присутствуют проблемные места. По всей длине входной кромки присутствуют высокие значения по пластическим деформациям, а также в нижней части выходной кромки наблюдаются высокие значения пластических деформаций в районе перемычек. На большинстве натуральных образцов (рисунок 2, б) имеются сколы керамического стержня на входной кромке, там же показаны трещины в районе нижней части выходной кромки. Полученные данные по распределению пластических деформаций в керамическом стержне хорошо согласуются с экспериментальными запрессовками.

Одним из основных факторов возникновения трещин на керамическом стержне является неравномерность фронта течения модельной массы внутри пресс-формы. Также к факторам трещинообразования можно отнести неправильно подобранный режим запрессовки и начальные микротрещины внутри керамического стержня.

Для предотвращения образования трещин в керамическом стержне можно варьировать несколько параметров: температуру запрессовки модельного состава; значение массового расхода, в том числе сделать его переменным во времени. Также возможно внести небольшие конструктивные изменения в саму пресс-форму: изменить расположение зоны впрыска модельного состава; изменить расположение штырьков, закрепляющих стержень в пресс-форме; изменить величину зазора между элементами пресс-формы, керамическим стержнем и моделью лопатки.

Литература

- [1] Coclite, A.; Coclite, G.M.; De Tommasi, D. Capsules Rheology in Carreau–Yasuda Fluids. *Nanomaterials* 2020, 10, 2190. <https://doi.org/10.3390/nano10112190>
- [2] Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Демьянушко И.В., и др. Термопрочность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 455 с.

НЕОБРАТИМОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛА ПРОБКИ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ СЛУЧАЕ

Ковтанюк Л.В., Панченко Г.Л., Попова Е.О.

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
lk@iacp.dvo.ru, panchenko@iacp.dvo.ru, polenao@bk.ru

В работе рассматривается численное решение связанной краевой задачи теории больших деформаций [1] о деформировании пробки конечной длины в круглой трубе под действием изменяющегося перепада давления, заданного на граничных поперечных поверхностях пробки. Материал пробки предполагается несжимаемым и обладающим упругими, вязкими и пластическими свойствами. На боковой поверхности пробки задано условие прилипания. Необратимые деформации накапливаются в материале пробки с начала процесса деформирования и могут быть как деформациями ползучести, так и пластическими деформациями. Необратимые деформации вызывают разогрев материала пробки в процессе деформирования. Параметры ползучести, предел текучести и коэффициент динамической вязкости материала предполагаются зависящими от температуры. Рассмотрена ползучесть материала при увеличении перепада давления, возникновение вязкопластического течения и его развитие при дальнейшем увеличении нагружающих усилий.

Слой материала конечной длины l расположен в недеформируемой круглой трубе радиуса R в условиях прилипания. Этот слой имеет такой же радиус, как и труба и образует плотную пробку. Несжимаемый упруговязкопластический материал пробки проявляет свои вязкие свойства сначала в форме ползучести, затем при достижении напряженным состоянием поверхности нагружения – в форме вязкого сопротивления пластическому течению. Решение краевой задачи в цилиндрической системе координат r, φ, z ищется в классе функций $\theta = \theta(r, t)$, $u = u_z(r, t)$, $v = v_z(r, t)$, где $\theta = (T - T_0)T_0^{-1}$, T , T_0 – текущая температура и температура недеформированного состояния (комнатная температура), u и v – отличные от нуля компоненты векторов перемещений и скорости.

Перепад давления $p(t)$ задается на граничных поверхностях пробки $z = u(r, t)$ и $z = l + u(r, t)$. Граничные условия имеют вид

$$\sigma_{zz}(0, u(0, t), t) = -p(t), \quad \sigma_{zz}(0, l + u(0, t), t) = 0, \quad (1)$$

где σ_{zz} – компонента тензора напряжений, $r = 0$ – координата максимального перемещения граничных точек пробки.

Согласно второму условию (1), сопротивление продавливанию на свободном конце пробки при $r = 0$ предполагается отсутствующим. Но его можно задавать любой постоянной величиной, это никак не сказывается на способе получения решения задачи.

На боковой поверхности пробки принимаются условия прилипания в следующем виде:

$$u|_{r=R} = v|_{r=R} = 0$$

Пока пластическое течение не началось, необратимые деформации в материале накапливаются в результате медленного процесса ползучести, который зададим в форме степенного закона ползучести Нортон [2]

$$V(\boldsymbol{\sigma}) = B \Sigma^n (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3), \quad \Sigma = \max |\sigma_i - \sigma_j|, \quad \boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{\varepsilon}^v = \frac{\partial V(\Sigma)}{\partial \boldsymbol{\sigma}}.$$

Здесь $V(\boldsymbol{\sigma})$ – термодинамический потенциал; $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений; $\boldsymbol{\varepsilon}^v$ – тензор скоростей деформаций ползучести; σ_i – главные значения тензора напряжений; B , n – параметры ползучести материала. Необратимое деформирование материала вызывает его разогрев. Поэтому для температуры имеем следующие начальное и граничные условия

$$\theta(r, 0) = 0, \quad \left. \frac{\partial \theta(r, t)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \theta(r, t)}{\partial r} \right|_{r=R} = 0.$$

При дальнейшем увеличении перепада давления в некоторый момент времени t_1 на боковой поверхности пробки выполняется условие пластичности в форме обобщенного условия пластического течения Треска – Сен-Венана [3]

$$F(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon}^p) = k, \quad F(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon}^p) = \frac{1}{2} \max |\sigma_i - \sigma_j| - \eta \max |\varepsilon_k^p|,$$

в котором $\boldsymbol{\varepsilon}^p$, ε_k^p – тензор скоростей пластических деформаций и его главные значения; k – предел текучести; η – коэффициент вязкого сопротивления пластическому течению. С момента времени t_1 в материале начинается вязкопластическое течение. Для параметров ползучести и пластического течения принимаем зависимости [4, 5]:

$$B = \frac{c_1}{\sigma_0^{n-1}} \exp\left(-\frac{Q}{R_u T_0 (1 + \theta)}\right), \quad n = b_1 + \frac{b_2}{T_0 (1 + \theta)}, \quad k = k_0 \left(1 - \frac{\theta}{\theta_m}\right)^2, \\ \eta = \eta_0 \text{Exp}(-\nu T_0 \theta), \quad \theta_m = (T_m - T_0) T_0^{-1}.$$

Здесь c_1 , σ_0 , b_1 и b_2 – постоянные материала, Q – энергия активации, R_u – универсальная газовая постоянная, T_m – температура плавления деформируемого материала, k_0 , η_0 – предел текучести и вязкость материала при комнатной температуре, ν – экспоненциальная скорость.

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИАПУ ДВО РАН (темы № FFW-2021-0005, FFW-2022-0002).

Литература

- [1] Буренин А.А., Ковтанюк Л.В. Большие необратимые деформации и упругое последствие – Владивосток: Дальнаука, 2013. – 312 с.
- [2] Norton F.H. The creep steel of high temperature – Y.: Mc Graw Hill, 1929. – 110 p.
- [3] Ишлинский А.Ю., Ивлев Д.Д. Математическая теория пластичности – М.: Физматлит, 2001. – 704 с.
- [4] Alain I. The correlation between the power-law coefficients in creep: the temperature dependence // Journal of Materials Science – 1998. – V. 33. – P. 3201-3206.
- [5] Pla F. Bifurcation phenomena in a convection problem with temperature dependent viscosity at low aspect ratio // Physica D: Nonlinear Phenomena – 2009. – V. 238. – I. 5. – P. 572-580.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ УПРУГОДИФFUЗИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ КОНСОЛЬНО-ЗАКРЕПЛЕННОЙ ПЛАСТИНЫ ТИМОШЕНКО ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ПО ПОВЕРХНОСТИ НАГРУЗКИ

Земсков А.В.^{1,2}, Тарлаковский Д.В.^{2,1}

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва

²НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

azemskov1975@mail.ru, tdvhome@mail.ru

Балки, пластины и оболочки представляют собой основу большинства механических конструкций. При этом, ввиду развития современных технологий производства и условий эксплуатации технических систем, очень важным вопросом является учет взаимодействия полей различной физической природы в сплошных средах и тонкостенных конструкциях, работающих в условиях нестационарных многофакторных внешних воздействий.

За последнее время вышло очень большое количество работ, так или иначе связанных с исследованием эффектов взаимодействия механических и диффузионных полей. Можно утверждать, что в настоящее время сформирована достаточно строгая математическая теория механо-диффузии, основанная на феноменологических подходах и моделях термодинамики и механики сплошной среды [1,2].

В данной работе рассматривается задача о нестационарных колебаниях консольно-закрепленной с одной стороны прямоугольной ортотропной пластины Тимошенко, выполненной из многокомпонентного материала. Примыкающие к консоли стороны являются шарнирно опёртыми. Схема приложенных сил и изгибающих моментов, а также ориентация осей прямоугольной декартовой системы координат представлена на рисунке 1.

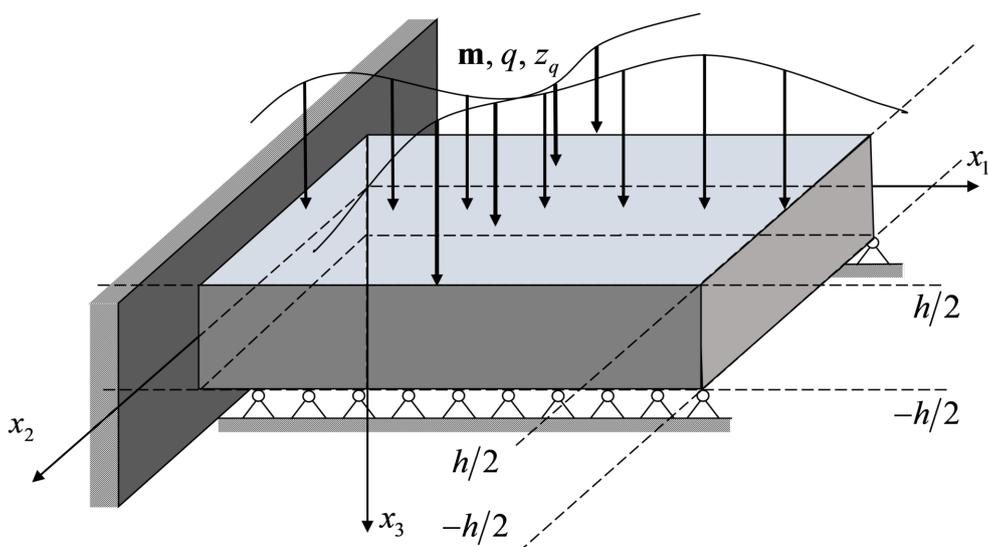


Рис. 1. Иллюстрация к постановке задачи.

Здесь m – распределённый по поверхности изгибающий момент, q – распределённая по поверхности поперечная нагрузка, $z_q (q = \overline{1, N})$ – распределённые по поверхности диффузионные потоки, N – количество независимых компонент в составе многокомпонентной среды, h – толщина пластины.

Математическая постановка представляет собой замкнутую систему уравнений поперечных колебаний пластины с учетом диффузии, которая получена с помощью обобщенного принципа виртуальных перемещений из общей модели механодиффузии для сплошных сред с конечной скоростью распространения тепловых и диффузионных потоков, основанная гипотезах Тимошенко [3].

Задача решается с помощью метода эквивалентных граничных условий [4]. Для этого рассматривается вспомогательная задача, решение которой получается с помощью преобразования Лапласа и разложения в тригонометрические ряды Фурье. Далее строятся соотношения, связывающее правые части граничных условий обеих задач, представляющая собой систему интегральных уравнений Вольтерры 1-го рода, решение которой ищется с помощью квадратурных формул. Вычисляя затем свёртку полученных отсюда функций с функциями Грина вспомогательной задачи находится решение исходной задачи для консольно закреплённой пластины Тимошенко.

Рассмотрен расчетный пример для трехкомпонентной пластины, находящейся под действием распределённой нестационарной поперечной нагрузки. На основании выполненных расчётов проанализированы механодиффузионные эффекты, возникающие при нестационарном изгибе консольно закреплённой пластины.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 20-19-00217).

Литература

- [1] Еремеев В.С. Диффузия и напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1984, 182 с.
- [2] Князева А.Г. Введение в термодинамику необратимых процессов. – Томск: Иван Федоров, 2014, 172 с.
- [3] Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Модель изгиба ортотропной консольно-закрепленной пластины Тимошенко под действием нестационарных механодиффузионных нагрузок // Математическое моделирование в естественных науках: матер. XXXII Всероссийской конференции (4–7 октября 2023 г.). – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2023. – с. 148-151.
- [4] Вестяк А.В., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Нестационарные упругодиффузионные колебания консольно-закрепленной пластины Тимошенко с шарнирным опиранием по боковым краям под действием нагрузки, приложенной к свободному краю // Материалы XXX Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.2. – М.: ООО "ТРИП", 2024. – с. 95-99.

ДИСЛОКАЦИОННО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ МЕЖКРИСТАЛЛИТНЫХ ПОТОКОВ ДИСЛОКАЦИЙ

Курмоярцева К.А.¹, Трусов П.В.²

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

kurmoartseva.k@mail.ru, tpv@matmod.pstu.ac.ru

Механические свойства изделий и конструкций в значительной степени определяются внутренней структурой материала. Большинство конструкционных материалов являются поликристаллическими. На процесс деформации поликристаллов существенное влияние оказывают границы зерен, в особенности – на процессы упрочнения, образования трещин и т.д. [1-3 и др.].

Вследствие различия ориентаций кристаллических решёток, границы зерен становятся препятствием для скольжения дислокаций, что приводит к образованию скоплений дислокаций и концентрации напряжений [2,4 и др.]. Экспериментально наблюдается неоднородность пластической деформации вблизи границ, что означает необходимость включения свойств границ зерен в модели для улучшения прогнозирования эволюции локальных напряжений и деформаций [5]. Дислокационно-ориентированные модели позволяют в явном виде включить физические механизмы эволюции дислокационных субструктур. В связи с этим предполагается расширить разрабатываемую на кафедре ММСП ПНИПУ дислокационно-ориентированную трехуровневую модель [6] подмоделью межкристаллитных потоков дислокаций. В данной модели был использован подход, базирующийся на физических теориях пластичности, благодаря чему модель обладает физической прозрачностью описания рассматриваемых процессов и универсальностью рассмотрения деформирования при разных условиях нагружения.

В разрабатываемой модели элементом верхнего уровня является представительный макрообъем. Выделяются также два структурно-масштабных уровня – мезоуровень-1 и мезоуровень-2, элементами которых являются кристаллиты (субзерна, фрагменты). Мезоуровни вводятся для описания различных рассматриваемых физических механизмов. На мезоуровне-1 описание деформирования кристаллитов производится в терминах континуальной механики (напряжений, деформаций, скоростей сдвигов). На мезоуровне-2 переменными являются скалярные плотности дислокаций на системах скольжения (СС) и скорости их движения. Эволюция плотностей дислокаций на СС реализуется за счет следующих механизмов: генерация (за счет работы источников Франка-Рида) и аннигиляция дислокаций (на близких СС), отток и приток дислокаций через границы зерен и субзерен. Поток дислокаций определяется как произведение плотности дислокаций на среднюю скорость их движения (размерность $[м^{-1}с^{-1}]$). Вычисление потоков дислокаций ведется только для активных СС, дислокации на которых движутся в сторону фасетки границы.

Исследователи выделяют следующие параметры, позволяющих прогнозировать, произойдет ли переход дислокаций и какие системы скольжения могут быть активированы в соседних зернах: геометрическое соответствие входящей и выходящей СС, касательные напряжения и остаточный вектор Бюргерса, который остается при переходе [4,7 и др.]. В разрабатываемой подмодели потоков дислокаций планируется определять наиболее благоприятную для

перехода СС соседнего кристаллита с помощью условия минимальности несовместности скоростей сдвигов. Данный критерий учитывает остаточный вектор Бюргерса в границе, взаимное расположение СС и реализуемые сдвиги. При наличии разориентации кристаллических решеток соседних кристаллитов происходит образование остаточных дислокаций в фасетке границе зерна, которые влияют на критические напряжения на СС обоих кристаллитов.

Были проведены тестовые расчеты с использованием подмодели межкристаллитных потоков дислокаций на примере бикристалла. Рассмотрены различные варианты напряженно-деформированного состояния кристаллитов и ориентации фасетки границы. Получены результаты, качественно соответствующие данным, имеющимся в литературе. Таким образом, дислокационно-ориентированное моделирование с учетом подмодели межкристаллитных потоков дислокаций позволяет детально описывать неоднородность пластической деформации вблизи границ зерен, что критически важно для описания процессов зарождения трещин.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002).

Литература

- [1] Кайбышев О. А., Валиев Р. З. Границы зерен и свойства металлов. — М.: Metallurgy, 1987. — 214 с.
- [2] Мак Лин, Д. Границы зерен в металлах: Перевод с англ. М. А. Штремеля. — Москва: Metallurgizdat, 1960. — 322 с.
- [3] Liu W. et al. Dislocation-grain boundary interaction in metallic materials: Competition between dislocation transmission and dislocation source activation / Liu W., Liu Y., Sui H., Chen L., Yu L., Yi X., Duan H. // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. — 2020. — Vol. 145. — P. 104158.
- [4] Bayerschen E., McBride A.T., Reddy B.D., Böhlke T. Review on slip transmission criteria in experiments and crystal plasticity models // *Journal of Materials Science*. — 2016. — Vol. 51, № 5. — P. 2243–2258.
- [5] Bieler T.R., Alizadeh R., Peña-Ortega M., Llorca J. An analysis of (the lack of) slip transfer between near-cube oriented grains in pure Al // *International Journal of Plasticity*. — 2019. — Vol. 118. — P. 269–290.
- [6] Грибов Д.С., Трусов П.В. Дислокационно-ориентированная трехуровневая модель для описания деформирования поликристаллов: структура, алгоритм реализации, примеры применения для исследования сложного циклического нагружения // *Физическая мезомеханика*. — 2022. — Т.25, №4. — С.94-105.
- [7] Nieto-Valeiras E., Ganju E., Chawla N., Llorca J. Assessment of slip transfer criteria for prismatic-to-prismatic slip in pure Ti from 3D grain boundary data // *Acta Materialia*. — 2024. — Vol. 262. — P. 119424.



ФИЗИЧЕСКАЯ МНОГОУРОВНЕВАЯ СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОПИСАНИЯ МНОГОСТАДИЙНОЙ ГОРЯЧЕЙ ОСАДКИ

Безверхий Д.С., Кондратьев Н.С.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
bezverkhyds@yandex.ru, kondratevns@gmail.com

Большинство производственных технологических процессов изготовления изделий из конструкционных сплавов реализуется при повышенных и высоких температурах (выше 0.5 – 0.7 от гомологической). В процессе обработки давлением заготовок изделий при таких условиях в материалах реализуются процессы рекристаллизации и возврата, которые оказывают значительное влияние на внутреннюю структуру. Для описания технологических процессов, в том числе многостадийных, актуальной проблемой является создание физических конститутивных моделей, учитывающих эволюцию внутренней структуры материала при неупругом деформировании, включая сложные процессы рекристаллизации, сверхпластичности и др.

В работе рассматривается процесс прерывистой динамической рекристаллизации. Такой тип рекристаллизации реализуется при неупругом деформировании в указанном диапазоне температур, представляет собой двухстадийный процесс, включающий отдельные стадии зародышеобразования и последующие стадии роста зерен [1]. Процесс образования зародышей новых зерен связан с выпучиванием границ зерен [1]. При больших градиентах перемещений рекристаллизованные зерна полностью заменяют исходную микроструктуру [1], что приводит к изменению свойств материала.

В работе рассматривается технологический многостадийный процесс горячей осадки. Осадка – это промежуточный технологический этап, которому подвергается подавляющее большинство заготовок перед их дальнейшим формованием, термомеханической обработкой [2]. В процессе осадки заготовка претерпевает неравномерное деформирование в результате влияния сил трения на контактных плоскостях между поверхностями заготовки и бойками [2]. Неравномерность деформации и температур при горячей осадке приводит к неравномерному распределению размеров зерен по объему поковки, в том числе в результате рекристаллизации.

Традиционно промышленное производство изделий из металлов и сплавов опирается на опыт операторов, зачастую реализуется методом проб и ошибок [3]. Это отражается на стоимости и издержках производства [3]. Для повышения качества изготавливаемых изделий в результате оптимизации технологических процессов актуальным является применение методов численного моделирования. Применение перспективных многоуровневых конститутивных моделей позволяет исследовать не только напряженно-деформированное состояние, но и эволюцию материальной структуры [4]. Для моделирования технологического процесса многостадийной осадки применяется программный комплекс конечно-элементного моделирования Abaqus и встроенная в этот комплекс феноменологическая модель теории пластического течения. Для отдельных материальных точек формируемой заготовки определяются значения компонент тензора скорости деформации \mathbf{D} и температур Θ , которые передаются в разработанную авторами

многоуровневую конститутивную модель [5] для детального исследования состояния структуры материала с учетом динамической рекристаллизации. Данный подход к моделированию процесса позволяет снизить вычислительную ресурсоемкость многоуровневых моделей, а также детально исследовать материальные характеристики (размер зерна, плотность дефектов, текстура и др.) в наиболее нагруженных областях заготовки. В результате применения многоуровневой конститутивной модели динамической рекристаллизации [5] для отдельных материальных точек заготовки было исследовано поведение внутренней структуры: эволюция размеров зерен, плотности дислокаций, напряженно-деформированное состояние.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002).

Литература

- [1] Humphreys J., Rohrer G.S., Rollett A. Recrystallization and Related Annealing Phenomena. – Oxford: Elsevier, 2017. – 704 p.
- [2] Kajtoch J. Strain in the upsetting process //Metallurgy and foundry engineering. – 2007. – Vol. 33, №. 1. – P. 51–61.
- [3] Mwema F. M. et al. Effect of punch force on the upsetting deformation process using three-dimensional finite element analysis //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 1378, №. 3. – P. 032094.
- [4] Karbasian H., Tekkaya A.E. A review on hot stamping //Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – Vol. 210, №. 15. – P. 2103–2118.
- [5] Bezverkhy D.S., Kondratev N.S. Multilevel statistical model for describing discontinuous dynamic recrystallization //Russian Physics Journal. – in Print.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ТОЧЕЧНЫХ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ

Матвеев В.П., Сероваев Г.С., Галкина Е.Б., Конюхов В.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
serovaev@icmm.ru

Среди множества чувствительных элементов волоконно-оптические датчики (ВОД) обладают значительными перспективами использования для оценки механического состояния конструкций благодаря малым размерам, невосприимчивости к электромагнитным помехам, низким потерям сигнала при большой протяженности оптического волокна, а также способности работать в широком диапазоне условий окружающей среды.

Принцип работы точечных датчиков на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР) основан на регистрации отраженной части запускаемого в оптическое волокно широкополосного оптического сигнала. При изменении длины брэгговской решетки (деформировании) происходит сдвиг резонансной длины волны отраженного спектра, по которому вычисляется осевая деформация в области расположения ВБР.

В отличие от точечных ВОД на основе ВБР, где чувствительностью к изменениям деформации и температуры обладает только малая область оптического волокна, где записана решетка, в распределенном ВОД в качестве чувствительного элемента используется вся длина оптического волокна. В частности, при использовании распределенного ВОД на основе рэлеевского рассеяния, внешнее воздействие на оптическое волокно (деформация, температура) вызывает сдвиг сигнала в частотной области относительно отсчетного. Для вычисления деформации или температуры производится оценка сдвига сигнала на определенном окне относительно отсчетного и умножение данной величины сдвига на коэффициент деформационной или температурной чувствительности оптического волокна. Сдвиг спектра ($\Delta\nu$) измеряемой области оптического волокна аналогичен сдвигу спектра или сдвигу резонансной длины волны ($\Delta\lambda$) брэгговской решетки и связан с изменением деформации и температуры следующим образом:

$$\Delta\lambda/\lambda = -\Delta\nu/\nu = K_\varepsilon \cdot \varepsilon + K_T \cdot \Delta T,$$

где K_T и K_ε температурный и деформационный коэффициенты. Для большинства оптических волокон с германосиликатной сердцевиной $K_T = 6.45 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$, $K_\varepsilon = 0.78$.

В работе приведены результаты исследования статистических характеристик шума, присутствующего в показаниях точечных ВОД на основе ВБР и распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния. Получены данные об амплитуде размаха показаний, стандартном отклонении показаний от среднего значения. Продемонстрировано применение фильтра скользящего среднего для снижения уровня шума. Исследование данных о разбросе показаний в отсутствие внешних воздействий важно для оценки минимального порога изменения деформаций, который способен зафиксировать датчик и актуально для задач, требующих точного измерения малых величин деформаций (Рисунок 1).

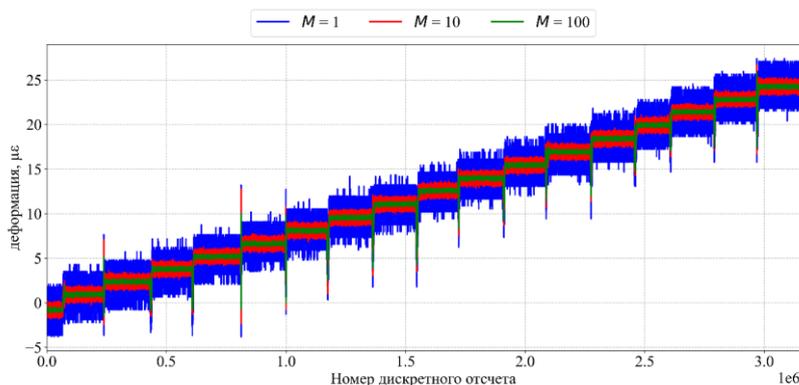


Рисунок 1 – Показания ВБР при ступенчатом нагружении с применением фильтра скользящего среднего с разным количеством усредняемых отсчетов

Приведены результаты исследования влияния градиента деформаций на форму отраженного спектра ВБР и на достоверность показаний распределенного ВОД. Исследования проведены для ВБР длиной 5, 10 и 15 мм. Рассмотрены ВБР изготовленные с помощью двух технологий записи: метод фазовой маски (5 и 10 мм), требующей снятия защитного покрытия в области записи с последующим перепокрыванием и поточечная запись фемтосекундным лазером, позволяющая записывать ВБР в сердцевине оптоволокна сквозь защитное покрытие, сохраняя его целостность.

Одной из особенностей распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния является возможность программного выбора длины участка (базы датчика), на котором вычисляется точка измерения деформаций. В отличие от точечных ВОД на основе ВБР, для которых длина измерительного участка фиксирована, для распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния возможен выбор оптимальной для конкретного распределения деформаций базы датчика, что позволяет увеличить точность измерения деформаций, в особенности для существенно неоднородного типа распределения деформаций (Рисунок 2).

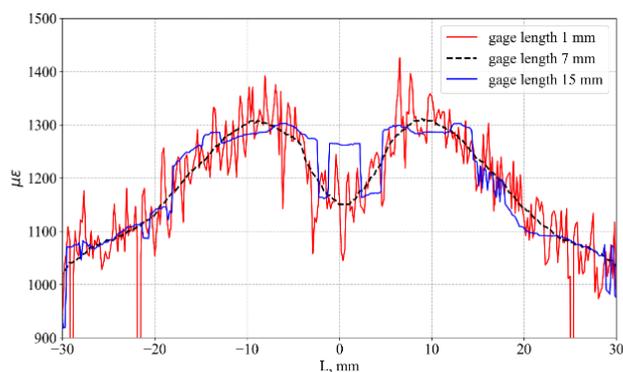


Рисунок 2 – Распределение деформаций вдоль центральной осевой линии образца, полученные распределенным ВОД при разных базах датчика

Продемонстрированы особенности измерения деформаций с помощью распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния, связанные с выбором базы датчика, диапазона длин волн сканирования, наличием в тестируемом оптическом волокне ВБР. Продемонстрировано влияние данных параметров на точность измерения деформаций при однородном и неоднородном распределении деформаций вдоль оптического волокна.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ В ОБРАЗЦАХ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ

Галкина Е.Б., Сероваев Г.С., Конюхов В.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
galkina.e@icmm.ru, serovaev@icmm.ru, koniukhov.v@icmm.ru

Аддитивные технологии набирают популярность и становятся востребованными во многих отраслях и сферах жизни, таких как авиа-, автомобиле- и судостроение, промышленное и гражданское строительство, медицина, сельское хозяйство и пищевая промышленность. Одной из наиболее распространенных и доступных технологий аддитивного производства является 3D печать методом послойного наплавления (Fused Deposition Modeling, FDM). 3D печать позволяет значительно сократить сроки разработки и проектирования. Одними из самых распространенных материалов, используемых при изготовлении конструкций по аддитивным технологиям, являются термопластичные материалы, которые подвержены значительным изменениям температуры, технологическим деформациям и усадкам в процессе изготовления. В качестве материала могут выступать любые из распространенных термопластов, используемых при изготовлении объектов по данной технологии, так как температура их плавления не превышает допустимые температуры для оптического волокна. К таким материалам можно отнести полилактид (PLA), полиэтилентерефталат-гликоль (PET-G), акрилонитрил бутадиен стирол (ABS), ударопрочный полистирол (HIPS) и другие. Применение термопластичных материалов, используемых в FDM-печати, требует особого внимания и изучения их механических характеристик при различных технологических параметрах.

Одним из возможных вариантов регистрации данных о механическом состоянии конструкций является применение современных измерительных систем, в частности, волоконно-оптических датчиков (ВОД). ВОД отличаются высокой чувствительностью и точностью измерений, а их малые размеры и физико-механические характеристики позволяют внедрять их в структуру материала непосредственно в процессе изготовления [1], что открывает широкие возможности для мониторинга напряженно-деформированного состояния изделия как в процессе производства, так и при последующей эксплуатации. В работе рассматриваются ВОД: точечные на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР) и распределенные на основе обратного рэлеевского рассеяния. В отличие от точечных ВОД на основе ВБР, где чувствительностью к изменениям деформации и температуры обладает только малая область оптического волокна, где записана решетка, в распределенном ВОД в качестве чувствительного элемента используется вся длина оптического волокна.

Процесс печати изделий с внедренным оптическим волокном можно разделить на три основных этапа. На первом этапе производится печать до места расположения оптического волокна. На втором этапе производится приостановка печати, укладка и крепление оптического волокна. Последний этап заключается в возобновлении процесса печати до завершения. Возможны разные способы размещения оптического волокна при встраивании. Один из вариантов заключается в сохранении плоскости сечения по толщине, где располагается оптическое волокно на рисунке 1.а и фиксации волокна, например при помощи клеевого соединения. Второй вариант подразумевает создание специального

углубления на этапе построение модели, в которое будет укладываться оптическое волокно на рисунке 1.б. Размер углубления должен быть сопоставим с диаметром используемого оптического волокна, при этом соблюдение точности данных размеров при печати будет зависеть от характеристик печатающего устройства. Данный подход является более трудоемким, однако позволяет лучше фиксировать волокно при возобновлении печати и упрощает непрямолинейную укладку волокна.

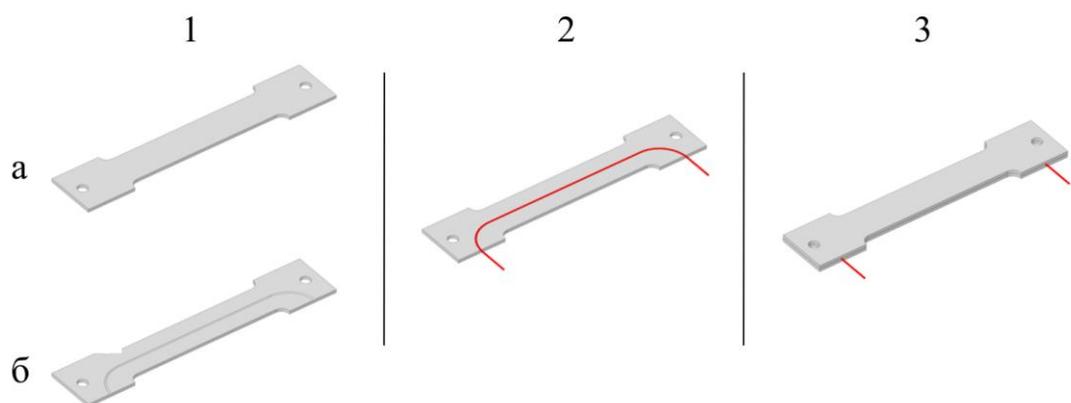


Рисунок 1 — Этапы изготовления образца по технологии 3D печати со встроенными ВОД

В работе продемонстрированы возможности использования встроенных волоконно-оптических датчиков для регистрации технологических и остаточных деформаций в процессе изготовления конструкции с помощью FDM-печати. Экспериментальная демонстрация измерения деформаций и температур с помощью встроенных волоконно-оптических датчиков проведена на примере образцов различной геометрии, в которых реализуется существенно неоднородное распределение технологических деформаций. Описан процесс создания образца с внедренными оптоволоконными линиями с температурным и деформационными ВОД. Произведена регистрация изменения деформаций в процессе печати образца и после окончания печати. Проведен сравнительный анализ уровня остаточных деформаций распространенных термопластов. И показано, что основной процесс формирования технологических деформаций сжатия начинается после окончания процесса печати.

Литература

[1] Матвеев В.П., Кошелева Н.А., Сероваев Г.С. Экспериментальные и теоретические результаты, связанные с измерением деформаций, встроенными в материал волоконно-оптическими датчиками на брэгговских решетках // Известия Российской Академии Наук. Механика Твёрдого Тела. – 2021. – № 6. – С. 3–15.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ПОСТОЯННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ЧЕТЫРЁХТОЧЕЧНЫЙ ИЗГИБ

Фёдоров А.Ю., Сероваев Г.С., Галкина Е.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
fedorov@icmm.ru, serovaev@icmm.ru, galkina.e@icmm.ru

Определение физико-механических характеристик строительных материалов играет важную роль при проектировании зданий и сооружений, способных выдерживать заданные эксплуатационные нагрузки. Исследованию прочностных и деформационных характеристик строительных материалов посвящено достаточно много работ в отечественной и зарубежной литературе. К прочностным характеристикам относятся прочность на растяжение, прочность на сжатие и прочность на изгиб. Основными деформационными характеристиками являются: модуль упругости, коэффициент Пуассона. Способность породы сопротивляться действующей нагрузке главным образом характеризуется величинами предела прочности при сжатии и при растяжении. Большинство работ, посвященных исследованию прочностных характеристик, связаны с испытаниями в режиме одноосного сжатия, требования к проведению которых регламентируются нормативными документами [1–3]. Известно, что отношение предела прочности на сжатие к пределу прочности на растяжение для некоторых строительных материалов, таких как бетоны, кирпичи, колеблется от 4 до 10. Ввиду малого значения прочности при растяжении именно растягивающие, а не сжимающие напряжения могут являться причиной нарушения нормальных условий эксплуатации сооружений. Поэтому особый интерес представляют исследования деформационных процессов при растяжении.

Методы определения прочности при растяжении являются более сложными, их можно разделить на две группы: прямые и косвенные. Массовые определения предела прочности при растяжении выполняются косвенными методами, которые в свою очередь, делятся на: методы раскалывания сжимающими нагрузками, методы изгиба. Основной задачей косвенных методов является оценка только прочности при растяжении. При этом другие механические характеристики растягивающего нагружения, такие как: разрушающая деформация, модуль деформации, модуль упругости и др., получить либо не удастся, либо необходимо использовать иные подходы.

В настоящей работе рассматривается методика определения упругих постоянных: модулей упругости и коэффициентов Пуассона строительных материалов на основе результатов измерения деформаций прямоугольных призматических образцов при четырёхточечном изгибе (Рис. 1), в котором в отличие от известных вариантов одновременно с модулями упругости определяются и коэффициенты Пуассона, а для измерения деформаций используются волоконно-оптические датчики [4]. Использование этих датчиков обеспечивает простую конструктивную схему измерения продольных и поперечных деформаций в зонах сжатия и растяжения.

Приводятся примеры определения упругих постоянных типовых строительных материалов при растяжении и сжатии с анализом максимальных погрешностей определения модулей упругости и коэффициентов Пуассона, которые могут иметь место в рассматриваемом методе. Эти погрешности обусловлены: использованием датчиков на брэгговских решётках,



Рисунок 1 — Фотография испытания образца в виде прямоугольной балки на четырёхточечный изгиб

погрешностью измерения деформаций, соответствием размеров образца допущениям, используемым при вычислении деформаций. Эффективность предлагаемого метода иллюстрируется результатами определения упругих постоянных различных строительных материалов.

Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124020700047-3.

Литература

- [1] ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Стандартинформ, 2013. – 35 с.
- [2] ГОСТ Р 57349–2016. Кирпич и блоки. Метод определения прочности на сжатие. – М.: Стандартинформ, 2017. – 35 с.
- [3] ГОСТ Р 8462–85. Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 7 с.
- [4] Matveenko V.P., Serovaev G.S., Fedorov A.Y., Galkina E.B., Zaitsev A.V. Determination of elastic moduli and Poisson's ratios of bi-modulus materials based on the results of four-point bending test // Materials and Structures. – 2024. – Vol. 57. – 96. – DOI: 10.1617/s11527-024-02373-3.



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗБУЖДЕНИЯ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ В СЛОИСТОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ПОДЛОЖКЕ ПЛЕНОЧНЫМ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОМ

М.В. Варелджан¹, А.А. Еремин¹, Е.В. Глушков¹, Н.В. Глушкова¹

¹Кубанский государственный университет, Краснодар

michael.vareldzhan.777@mail.ru

При проектировании систем неразрушающего контроля и мониторинга состояния конструкций, использующих бегущие упругие волны, важным этапом является компьютерное моделирование работы пленочных пьезопреобразователей в качестве источников ультразвуковых колебаний. Решение подобного рода задач может быть осуществлено с помощью конечно-элементных программных пакетов. Однако, если при применении такого подхода в двухмерной постановке существенных сложностей не возникает, то при моделировании волновых процессов в трехмерном случае вычислительные затраты как в плане времени, так и потребности в оперативной памяти значительно возрастают, особенно при рассмотрении многослойных анизотропных структур. Поэтому актуальным является развитие альтернативных численных схем, сочетающих сеточную дискретизацию локальной области, содержащей пьезоактуатор, с аналитическими представлениями для бегущих упругих волн, которые позволяют сократить вычислительные затраты и эффективно проводить параметрический анализ соответствующих волновых процессов.

Для решения задачи о возбуждении колебаний в упругой анизотропной подложке ранее были получены эффективные с вычислительной точки зрения интегральные и асимптотические представления [1]. Информация об источнике колебаний учитывается в них через вектор-функцию контактных напряжений. Имея аналитическое представление прикладываемой к поверхности волновода нагрузки, становятся доступными все преимущества полуаналитического интегрального подхода, такие как быстрое определение амплитудно-частотных характеристик возбуждаемых волн и возможность анализа распределения между ними волновой энергии, поступающей от источника с учетом его механического поведения, а также влияния таких сопутствующих факторов, как наличие клеевой прослойки между пьезоэлементом и волноводом, сложной геометрии электродирования пьезоэлемента и т.п. Для получения таких представлений предлагается обобщение разработанной ранее для случая изотропного волновода двухэтапной вычислительной схемы [2]: на первом этапе с помощью МКЭ решается трехмерная контактная задача о динамическом взаимодействии пьезопреобразователя с анизотропной упругой подложкой; далее амплитудные коэффициенты находятся из решения системы граничных интегральных уравнений (ГИУ), в которых полученные с помощью МКЭ смещения, взятые из соображений вычислительной эффективности на нижней границе волновода, входят в правую часть, а ядро определяется матрицей Грина подложки. Для преобразователя произвольной формы численное решение ГИУ строится вариационно-разностным методом [3].



Возможность применения разработанной методики в случае моделирования процессов возбуждения бегущих упругих волн пленочными пьезоэлементами подтверждается сопоставлением получаемых на ее основе результатов с полными МКЭ-моделями. В качестве примера использования предложенной двухэтапной схемы для параметрического анализа волновых процессов, изучается распределение волновой энергии по отдельным нормальным модам, возбуждаемым пленочным пьезоэлементом в анизотропной подложке в зависимости от геометрических характеристик актуатора и упругих свойств материала волновода.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № FZEN-2024-0003.

Литература

- [1] E. Glushkov, N. Glushkova, A. Eremin // Forced wave propagation and energy distribution in anisotropic laminate composites, J. Acoust. Soc. Am., 129:5 2011. 2923-2934
- [2] М. В. Варелджан // Двухэтапная вычислительная схема для моделирования возбуждения упругих колебаний в изотропном слое поверхностным пьезопреобразователем, Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 21:1 2024. 57-69
- [3] Бабешко, В.А., Глушков, Е.В., Глушкова, Н.В. К проблеме динамических контактных задач в произвольных областях. Известия АН СССР МТТ, 1978, №3, с. 61–67.

СРАВНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ АКТУАТОРОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ВИБРОДИАГНОСТИКЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Шардаков И.Н., Шестаков А.П., Глот И.О., Гусев Г.Н., Епин В.В., Цветков Р.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

shap@icmm.ru

Активная вибродиагностика с применением пьезокерамических актуаторов является эффективным методом оценки механического состояния конструкций. В работе рассмотрено три варианта пьезокерамических актуаторов, предназначенных для вибродиагностики железобетонных конструкций. В них в качестве источника вибраций используется пьезокерамическая пластина, размещенная на поверхности бетона, заглубленная в тело бетона или усиленная дополнительной массой. С помощью численного эксперимента продемонстрировано распространение деформационной волны, возбуждаемой этими актуаторами, в бетонной плите и пространственной бетонной конструкции в виде модельного 4-этажного здания. На основе полученных результатов сделаны следующие выводы.

Уровень силового воздействия у актуаторов различной конструкции существенно отличается. Актуатор в виде пьезокерамической пластины, расположенной на поверхности бетона, вызывает самый низкий деформационный отклик инспектируемой конструкции. Амплитуда деформационной волны в этом случае оказывается в 1.9 раза ниже, чем для актуатора, заглубленного в бетон, и в 12 раз меньше по сравнению с усиленным актуатором.

Пьезокерамическая пластина, заглубленная в бетон, возбуждает несимметричную деформационную волну, имеющую наибольшую амплитуду вдоль вектора поляризации пьезокерамики. Это обстоятельство важно учитывать при выполнении вибродиагностики.

В конструкциях сложной пространственной конфигурации процесс распространения деформационной волны происходит нетривиальным образом. Он сопровождается перераспределением и отражением волны на различных элементах конструкции, что усиливает затухание колебаний. Актуаторы неусиленной конструкции могут оказаться недостаточными, чтобы возбудить сигнал, который может быть зарегистрирован на достаточном удалении от точки воздействия. В этом случае наилучшим решением представляется использование актуатора с присоединенной массой, порождающего деформационный отклик значительно большей интенсивности. Численный эксперимент показал, что вибрационная волна, возбуждаемая актуатором с присоединенной массой, может успешно регистрироваться на значительном удалении (более 9 м) от места воздействия.

Таким образом, для выполнения активной вибродиагностики крупномасштабных бетонных конструкций наиболее перспективным является пьезокерамический актуатор с присоединенной массой. Он обеспечивает существенное увеличение амплитуды диагностических сигналов по сравнению с актуаторами в виде пьезокерамической пластины. Использование таких актуаторов позволяет снизить общее количество актуаторов и сенсоров системы мониторинга за счет увеличения расстояния между ними.

ДЕГРАДАЦИЯ ДАТЧИКОВ В СИСТЕМЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА И МЕТОД ЕЕ ДИАГНОСТИКИ

Гусев Г.Н.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
gusev.g@icmm.ru

Сроки эксплуатации ответственных строительных конструкций составляют несколько десятков лет. Особенности эксплуатации и назначение такого рода объектов предполагают особый уровень контроля их деформационного состояния, который решается с помощью систем интеллектуального мониторинга. Интеллектуальный мониторинг – это комплекс методов, который призван обеспечить безаварийную и бесперебойную работу этих сооружений на всем периоде их эксплуатации. Данный комплекс включает в себя различные этапы: техническое обследование строительных конструкций, математическое моделирование объекта с оценкой возможности развития различных сценариев критических состояний, разработка, и реализация систем мониторинга деформационного состояния с установкой необходимой контрольно-измерительной аппаратуры [1-3], верификация модели, а также интерпретация и анализ получаемых данных, на основе которых вырабатывается решение о работоспособности конструкций и необходимых мерах по их ремонту. Все это, помимо ряда условий о точности измерений, требует долговременной и надежной работы всех элементов системы мониторинга.

Надежная работа измерительного элемента - датчика, как первичного в иерархической структуре элементов всей системы, имеет первостепенное значение, чтобы с накоплением времени наработки фиксировать истинные изменения деформационных параметров самой конструкции, а не чувствительного элемента датчика или его крепления. Но что делать если при длительной работе в том числе в агрессивных условиях окружающей среды происходит деградация датчиков? Как отличить ее от деградации конструкции? Данной проблеме на примере длительного мониторинга стальных большепролетных конструкций покрытия спортивного комплекса посвящена данная работа [4]. Предложена методика, которая позволила выявить и обосновать наличие проблем именно с датчиками и их работоспособностью в системе деформационного мониторинга. Объектом исследования на протяжении вот уже 13 лет являются стальные ферменные конструкции покрытия спортивного комплекса, расположенного в г. Пермь.

В качестве метода выявления факта деградации измерительного элемента, без снятия измерительной аппаратуры и приостановлении работы пусть и части системы, что немаловажно, был предложен следующий алгоритм. Был разработан проект дополнительных, дублирующих «проблемные» места ветвей системы деформационного мониторинга. На базе ИМСС УрО РАН, г. Пермь и на основе предыдущего опыта работы с датчиками деформации тензометрического типа в сложных условиях [5], были произведены и смонтированы на несущих элементах конструкций ферм еще восемь дополнительных датчиков деформации. Все датчики попарно дублировали измерения в 4-х «проблемных местах».

На рисунке 1 представлены результаты измерений за 2021 – 2024 гг. для датчиков группы ф.37. Видно, что накопление значений деформаций для датчика ф.37-3 неуклонно

продолжается на всем периоде измерений. Что не подтверждается данными измерений прогиба фермы №37, который пересчитывается из показаний инклинометра – рисунок 1б. Показания интегрированных в общую систему контроля деформационного состояния объекта восьми дублирующих датчиков за весь период их работы (чуть более года) стабильны и не имеют тренда с накоплением значений. Все это в полном объеме справедливо для всех контрольных точек, которые были исследованы на предмет выявления деградации измерительных элементов.

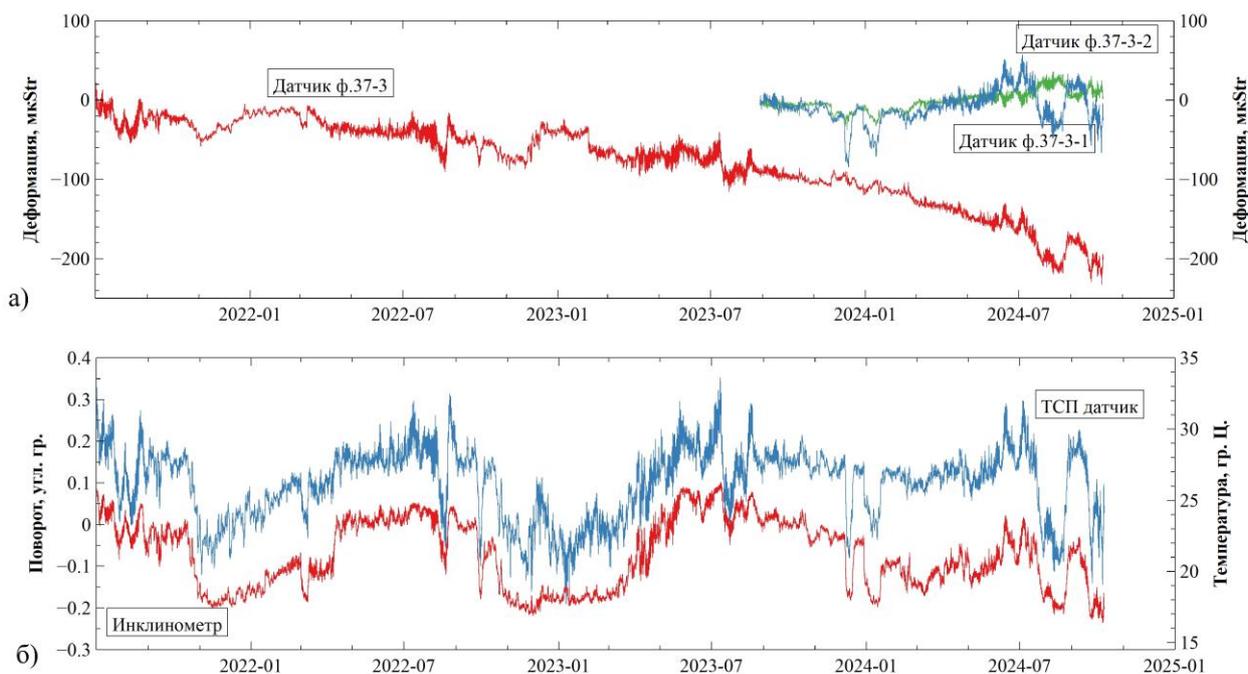


Рис.1. Данные измерений для датчиков на ферме №37. а) - показания деформаций для датчика ф.37-1 и новых (дублирующих) ф.37-1-1 и ф.37-1-2; б) - показания деформаций для датчика ф.37-2 и новых (дублирующих) ф.37-2-1 и ф.37-2-2; в) - показания деформаций для датчика ф.37-3 и новых (дублирующих) ф.37-3-1 и ф.37-3-2; г) - показания деформаций для датчика ф.37-4 и новых (дублирующих) ф.37-4-1 и ф.37-4-2.

Литература

- [1] Гурьев В.В., Гранев В.В., Дмитриев А.Н., Дорофеев В.М., Келасьев Н.Г., Лысов Д.А. Опыт применения автоматизированных станций мониторинга на уникальных строительных объектах – Москва, 2021. – С. 6–14.
- [2] Степанов Д.В., Макаров А.В., Валов А.В., Зубанов Е. С., Облетов Е. Н. Опыт эксплуатации системы мониторинга конструкций радиотелевизионной башни в – Москва, 2024. – С. 46–51.
- [3] Осадчий Г.В., Белый А.А., Ефанов Д.В., Шестовицкий Д.А. Мониторинг технического состояния раздвижной крыши стадиона «Санкт-Петербург Арена» – Москва, 2018. – С.10–24.
- [4] Гусев Г.Н., Цветков Р.В. Верификация численной модели кровли бассейна по результатам мониторинга – Москва, 2024. – С.47–53.
- [5] G. Gusev, I. Glot, V. Epin [et al.] Experience of using tensorresistive strain gauges in corrosive environments – Perm, 2021. – P. 49-55.



ФУРЬЕ- И ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ СИГНАЛОВ ВИБРОУСКОРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Зайцев А. В., Мильхин В. А., Мельников Д. Л., Судаков И. А., Шобей М. М.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
a-zaitsev@mail.ru, maksim-shobey@yandex.ru

Оценка работоспособности подшипников качения для авиационных двигателей состоит в определении их долговечности и безопасного ресурса. Одним из факторов, определяющих ресурс двигателя, является долговечность подшипниковых опор. Поэтому возникает потребность в разработке новой методики испытаний подшипниковых сталеи и проведения уточненных расчетов долговечности в пределах установленного ресурса. Еще одним фактором, влияющим на долговечность подшипников, является реализация требуемых условий смазочной среды. Из-за нарушения в системе подачи смазки, например, может возникнуть кратковременный режим сухого трения с мгновенным повышением температуры. В результате на поверхности тела качения и на дорожке качения кольца подшипника возникают множественные локализованные дефекты небольшой глубины. Эти каверны являются начальными концентраторами и причинами появления зарождающихся усталостных трещин. Развитие процесса контактного усталостного выкрашивания материала шарика и/или дорожки качения в результате циклического воздействия может быть исследовано по результатам обработки сигналов вибропреобразователей. Для исследования механизмов и закономерностей подобного механического поведения проведены испытания деталей подшипников с модельными (нанесенными искусственно на поверхность) локализованными поверхностными дефектами.

Проведены натурные испытания бездефектного роликового подшипника NU206W на специально сконструированном в лаборатории «Трибодиагностика и контактная прочность» ПНИПУ стенде ДМ–28 при частотах вращения 1070, 2060 и 3040 об/мин, и нагрузке 215 Н. Количество тел качения диаметром 7,5 мм было равно 13. На корпус исследуемого подшипника был установлен вибропреобразователь DV-1 21.0, входящий в состав системы вибромониторинга ТК RVM. Были зарегистрированы сигналы виброускорения при испытании бездефектного подшипника течение 2 с. Далее подшипник, с которым проводились испытания, был демонтирован. С помощью электрографического карандаша на внутренне кольцо был нанесен дефект шириной 600 мкм и длиной 20 мм. После нанесения дефекта проведены повторные испытания при той же нагрузке, на тех же частотах вращения и. Были получены сигналы виброускорения при испытании подшипника с дефектом длительностью 2 с.

Проведен спектральный (Фурье-анализ) сигналов виброускорения и анализ с помощью непрерывных вейвлет-преобразований Mexican Hat, Paul, Gabor и Morlet. В результате проведенного анализа построен «портрет виброускорений» бездефектного роликового подшипника, подтверждена частота вращения ротора, а также идентифицированы частоты, связанные с локализованным модельным дефектом на внутреннем кольце.



НАНОИНДЕНТАЦИЯ ЖЕСТКОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОЛИМЕРНОЙ ПОДЛОЖКЕ

Морозов И.А., Беляев А.Ю., Изюмов Р.И.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
imorozov@icmm.ru, belyaev@icmm.ru, izumov@icmm.ru

Эксперимент по индентации заключается во вдавливании зондового датчика в поверхность материала. Исследование силового отклика материала в зависимости от перемещения индентора (глубины вдавливания), а также отпечатка острия на поверхности позволяет судить о механических свойствах поверхности. В случае индентации слоистых гиперупругих материалов встают вопросы о площади контакта, необходимой для вычисления механических свойств, а также о границах применимости моделей контактного взаимодействия, разработанных для однородных линейно-упругих материалов.

Реальная геометрия острия зонда атомно-силового микроскопа не описывается простыми телами вращения. В работе методами конечных элементов исследовали особенности вдавливания индентора в форме усеченного конуса в жесткий слой на гиперупругой подложке. Варьировали размеры острия индентора, толщину и модуль упругости покрытия. Анализировали силовой отклик материала и площадь контакта в зависимости от глубины вдавливания. Установлено, что площадь контакта на малой глубине вдавливания соответствует цилиндрическому индентору, который асимптотически переходит в конус с увеличением глубины индентации. Для рассмотренных случаев модуль упругости поверхности может быть с достаточной точностью определен из начального участка кривой вдавливания, используя упрощенные выражения (без учета реальной площади контакта) по индентации цилиндром. Получив таким образом модуль поверхности и, зная форму индентора и толщину слоя, можно вычислить модуль упругости самого слоя, а также контактную глубину.

Экспериментально, в режиме наноиндентации атомно-силовой микроскопии, исследовали механические и прочностные свойства жестких нанопленок на поверхности полиуретана, полученных обработкой поверхностей в плазме аргона. Индентировали с различным усилием, вызывая повреждение покрытий, исследовали силовой отклик, глубину и площадь отпечатков. Используя результаты конечно-элементного моделирования, определили модуль упругости слоя и прочностные свойства поверхности. Полученные результаты объясняют особенности развития поверхностных трещин при одноосном растяжении образцов. В целом, представленный подход может найти применение в исследовании механических свойств тонких гибких пленок на упругом основании.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-22-00064.

ЭФФЕКТИВНЫЕ УПРУГИЕ МОДУЛИ ОСТЕОНА И КОМПАКТНОЙ КОСТНОЙ ТКАНИ ЧЕЛОВЕКА

Зайцев А.В., Мельников Д.Л.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

a-zaitsev@mail.ru, demidmeln@mail.ru

Во время занятия спортом возможны повреждения костной ткани, переломы. Для разработки новых методов предупреждения и лечения таких травм, для индивидуального подбора комплекса реабилитационных упражнений необходимо спрогнозировать изменение деформационных свойств остеона и компактной костной ткани. Используя полидисперсную модель однонаправленно-армированного композита З. Хашина [1] и многомасштабный подход, определены эффективные упругие модули остеона и компактной костной ткани с учётом биологического возраста человека.

Экспериментально подтверждено, что компактная костная ткань является трансверсально-изотропным биологическим композитом [2–4]. Кроме того, эксперименты по определению деформационных свойств ее отдельных структурных элементов – ламелей и остеонов, показывают, что они так же трансверсально-изотропны [3, 5].

Рост ламелей остеона происходит за счёт наращивания коллагеновых волокон. Это наращивание может происходить как вдоль оси кости, так и в поперечном направлении. В результате образуется поперечная и/или продольная коллагеновая текстура [6], определяющая ориентацию плоскости изотропии остеона.

Была сформулирована гипотеза о том, что направление роста коллагеновых волокон компактной костной ткани зависит от возраста человека. У молодого, несформированного скелета имеет место как поверхностный рост с увеличением поперечного сечения всей кости, так и рост в продольном направлении. В результате этого происходит наслоение участков волокон друг на друга с образованием поперечной структуры. У взрослого же с течением времени происходит отмирание живой костной ткани и образование радиальной структуры.

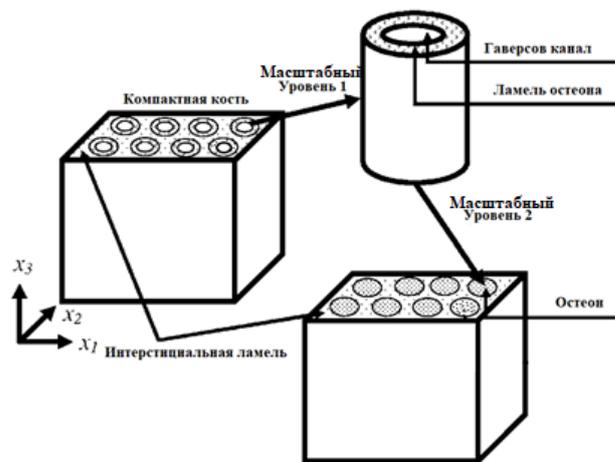


Рисунок. Уровни компактной костной ткани

Компактная костная ткань имеет два масштабных уровня (рисунок): «масштабный уровень 1» – трансверсально-изотропный составной цилиндр с эффективными модулями Юнга $E_{33}^{*(1)}$, объёмного сжатия при плоской деформации $K_{23}^{*(1)}$, а также коэффициентом Пуассона $\nu_{13}^{*(1)}$; «масштабный уровень 2» – представительный объём трансверсально-изотропной среды с цилиндрическими включениями с эффективными свойствами $E_{33}^{*(2)}$, $\nu_{13}^{*(2)}$ и $K_{23}^{*(2)}$. Часть свойств на масштабном уровне 2 являются спрогнозированными эффективными величинами предыдущего уровня 1, а «недостающие» упругие модули – экспериментальные данные [7].

В таблице представлены спрогнозированные значения эффективных модулей в зависимости от ориентации плоскостей изотропии (учитывает биологический возраст человека). Для масштабного уровня 1 объёмная доля гаверсова канала V_H является отношением его диамет-

ра (20–100 μm [8]) к диаметру всего остеона (150–350 μm [9]), а для масштабного уровня 2 объёмная доля остеона V_O (изменяется в пределах от 10 до 70 % [3]) определяется отношением площадей, занимаемых остеонами и интерстициальной ламели (отмершая ткань).

Таблица. Влияние ориентации плоскостей изотропии на эффективные модули остеона и компактной костной ткани человека

V_H	$E_{33}^{*(1)}$, ГПа	$\nu_{13}^{*(1)}$	$K_{23}^{*(1)}$, ГПа	V_O	$E_{33}^{*(2)}$, ГПа	$\nu_{13}^{*(2)}$	$K_{23}^{*(2)}$, ГПа
0,0177	17,4 / 18,16	0,39 / 0,36	11,48 / 20,96	0,1	19,05 / 20,22	0,4 / 0,3	12,46 / 22,36
0,0576	16,7 / 17,49	0,39 / 0,34	10,93 / 18,88	0,4	18,26 / 19,58	0,39 / 0,35	10,95 / 17,67
0,0816	16,27 / 16,95	0,39 / 0,33	10,56 / 17,59	0,7	17,48 / 18,58	0,39 / 0,34	8,95 / 13,67

Примечание: плоскость изотропии θr – числитель, θz – знаменатель.

Эффективные упругие свойства компактной костной ткани человека зависят от множества факторов [4, 6]: минерального состава, наличия заболеваний, возраста, уровня и характера функциональных нагрузок и др. Поэтому разброс экспериментальных значений упругих модулей существенен [10–13]: E_{33}^* – от 9,5 до 25 ГПа, K_{23}^* – от 8 до 20 ГПа и ν_{13}^* – от 0,2 до 0,4. Спрогнозированные в работе эффективные деформационные свойства для остеона и компактной костной ткани согласуются с экспериментальными данными.

Литература

- [1] Hashin Z. The elastic moduli of heterogeneous materials // J. Appl. Mech. – 1962. – Vol. 29, № 1. – P. 143–150.
- [2] Кнетс И.В. Механика биологических тканей: обзор // Механика полимеров. – 1977. – № 3. – С. 1084–1087.
- [3] Dong N., Guo X.E. Prediction of cortical bone elastic constants by a two-level micromechanical model using a generalized self-consistent method // J. Biomech. Eng. – 2006. – Vol. 128, № 3. – P. 309–316.
- [4] Зайцев А.В., Соколкин Ю.В., Фукалов А.А. Эффективные модули объёмного сжатия при плоской деформации двухфазных однонаправленно армированных композитов с анизотропными полыми и сплошными волокнами // Вестник ПНИПУ. Механика. 2011. № 4. С. 37–48.
- [5] Variations in the individual thick lamellar properties within osteons by nanoindentation / J.Y. Rho, P. Zioupos, J.D. Currey, G.M. Pharr // Bone. – 1999. – Vol. 25, № 3. – P. 295–300.
- [6] Martin R.B., Burr D.B., Sharkey N.A. Skeletal tissue mechanics. N.Y.: Shpringer-Verlag, 1998. – 382 p.
- [7] Finite element analysis of mid-diaphyseal transverse fracture based on cortical bone heterogeneity / N.N. Mansor, R. Daud, F. Mat et al. // J. Eng. Appl. Sci. 2017. – Vol.12, № 14. P. 4302–4306.
- [8] Relating osteon diameter to strain. / R.F.M. Oers, R. Ruimerman, B. Rietbergen et all // Bone. – 2008. – Vol.43, № 3. – P. 476–482.
- [9] Gartner L.P., Hiatt J.L. Concise histology //Phil: Saunders, 2010. – 352 p.
- [10] Method for evaluating cortical bone Young's modulus: numerical twin reconstruction, finite element calculation, and microstructure analysis / T. Kurtz, T. Woittrain, Y. Godio-Raboutet et all // J. Biomech. Eng. – 2023. – Vol.145, № 11– P. 30–42.
- [11] Mechanical and textural properties of pelvic trabecular bone / M. Dalstra, R. Huiskes, A. Odgaard, L. van Erning // J. Biomech.Eng. – 1993. – Vol.26, № 4 – 5 – P. 523–535.
- [12] Carleton K., Redish J. Macro models of matter:bulk modulus – solids//N.: HHMI,2011.–406 p.
- [13] Cortical bone continuum damage mechanics constitutive model with stress triaxiality criterion to predict fracture initiation and pattern / D.S. Cronin, B. Watson, F. Khor, D. Gierczycka et all // Front. Bioeng. Biotech.: Biomech. – 2022. –Vol. 10 – P. 1–15.

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИАНЭФИРНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ВСТ-1208 ДЛЯ НАДУВНЫХ ОТВЕРЖДАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОРБИТЕ

Поморцева Т.Н.¹, Фагалов А.Р.¹, Беляев А.Ю.²

¹Пермский государственный университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред, Пермь

tata.lisica@yandex.ru, slowards@gmail.com, belyaev@icmm.ru

Освоение космоса развивается быстрыми темпами. Современные реалии диктуют новые требования к космическим конструкциям. Возникает необходимость менять подход к исполнению и проектированию таких конструкций. Все чаще обсуждаются идеи надувных космических конструкций. Эта идея не нова и хорошо известна [1-6]. Такие конструкции имеют ряд преимуществ по сравнению с металлическими: меньший вес, более компактная упаковка, малая вероятность сбоя при развертывании. Практически все современные надувные конструкции поддерживают свою форму за счет подачи газа, что является ограниченным ресурсом. Препреговая технология устраняет эту проблему. Надувная конструкция, изготовленная из препрега, доставляется на орбиту в сложенном виде, распаковывается и отверждается за счет космического излучения от Солнца и Земли. После отверждения она становится жесткой и не требует подкачки газа для поддержания заданной геометрии.

В данной работе исследовалась цианэфирная смола ВСТ-1208 на предмет пригодности использования ее в качестве связующего для пропитки препрегов, из которых можно изготавливать надувные конструкции для космоса. Эксперименты в термошкафу позволили определить, что при температуре более 200⁰С отверждение происходит без выделения каких-либо компонентов. Дифференциальная сканирующая калориметрия показала, что в смоле идут две химические реакции при разных температурах (125⁰С и 175⁰С). Анализ кривых зависимости скорости подвода тепла для поддержания постоянной скорости нагрева вещества от температуры показал, что пик химической реакции приходится на промежуток 200-220⁰С.

Для ответа на вопрос о возможности достижения необходимой температуры была проведена оценка изменения температуры структурного элемента конструкции под действием тепловых потоков на околоземной орбите при влиянии лучистого теплообмена. Исследовано распределение температуры в конструкции при различных геометрических параметрах и материалах. Смоделирован структурный элемент надувной конструкции, изготовленный в виде цилиндра из отверждаемого в условиях космоса препрега. Рассматривалось несколько вариантов слоистости: структурный элемент состоит только из препрега; структурный элемент состоит из препрега, обернутого в силикон; структурный элемент состоит из препрега, силикона и слоя фольги. Данное моделирование показало, что лучистый теплообмен необходимо учитывать, так как он вносит значительный вклад в тепловые потоки, особенно при отсутствии внешнего слоя изолирующей фольги. Далее рассматривались различные вариации внешнего слоя (фольги): алюминиевая, медная и комбинированный вариант. Вариант с частичным медным покрытием оказался более приемлемым, так как позволяет получать структуры, стационарные температуры которых находятся в интересующем диапазоне.



Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта №С-26/1025.

Литература

- [1] Kondyurin A. V. Building the shells of large space stations by the polymerisation of epoxy composites in open space // *International Polymer Science and Technology*. 1998. Vol. 25. № 4. P. 78–80.
- [2] Xu Y., Fuling G. Structure design and mechanical measurement of inflatable antenna // *Acta Astronautica*. Elsevier. 2012. Vol. 76. P. 13–25.
- [3] Pestrenin V. M., Pestrenina I. V., Rusakov S. V., Kondyurin A. V. Curing of large prepreg shell in solar synchronous Low Earth Orbit: Precession flight regimes // *Acta astronautica*. 2018. Vol. 151. P. 342–347. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.06.029.
- [4] Пестренин В. М., Пестренина И. В., Русаков С. В., Гилев В. Г., Бузмакова Г. В. Использование упругих шарниров для упаковки и развертывания оболочечных конструкции // *Материалы XXI Междунар. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2019)*, Алушта. М.: Изд-во МАИ, 2019. С. 328–330.
- [5] Garishin O. K., Svistkov A. L., Belyaev A. Yu., Gilev V. G. On the Possibility of Using Epoxy Prepregs for Carcass-Inflatable Nanosatellite Antennas // *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 938. P. 156–163.
- [6] Поморцева Т. Н., Комар Л. А. О возможности создания крупногабаритных конструкций в условиях открытого космоса // *Вестник Пермского Университета. Математика. Механика. Информатика*. – 2023. – Выпуск 3 (62). – С.64–75.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КАРКАСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕФЛЕКТОРА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА, СОЗДАНЫХ НА ОСНОВЕ ПРЕПРЕГОВ САТИНОВОГО ПЛЕТЕНИЯ

Пелевин А.Г.¹, Комар Л.А.², Поморцева Т.Н.¹, Терпугов В.Н.¹

¹Пермский государственный университет, Пермь

²ООО «Лаборатория АРГУМЕНТ», Пермь

smile3k@yandex.ru, l.komar2010@yandex.ru, tata.lisica@yandex.ru, terpugov@psu.ru

Идея использования в космосе надувных крупногабаритных конструкций из композиционного материала с каждым годом становится все более привлекательной [1–3]. Такие конструкции обладают рядом преимуществ перед аналогами, созданными из металла. Они имеют высокий коэффициент упаковки и уменьшенный вес, обладают более высокой надежностью на этапе приведения складных конструкций в рабочее состояние. Все активнее в этой области исследований продолжает развиваться направление использования препрегов как основного строительного материала оболочки надувного изделия. Препреги представляют собой ткань, которую можно заранее в земных условиях пропитать полимерным связующим. На околоземной орбите конструкция разворачивается за счет подачи в ее надувные каркасные элементы внутреннего давления. После полной развертки препрег отверждается в результате нагрева от действия потока солнечного излучения. После завершения процесса отверждения оболочка конструкции становится жесткой.

В данной работе приведены результаты численного моделирования механического поведения надуваемых каркасных элементов рефлектора космического аппарата. В качестве материала для каркасных элементов предлагается использовать препреги на основе стеклокомпозитов сатинового плетения волокон. Экспериментальные испытания прочностных свойств отвержденного препрега осуществлялись в земных лабораторных условиях. Применялась эпоксидная смола горячего отверждения (Табл. 1).

Таблица 1. Свойства ткани Т-10 (92) и отвержденной эпоксидной смолы ЭДТ-69Н

	плотность, кг/м ³	модуль Юнга, МПа	коэффициент Пуассона	разрывные деформации, %	разрывные напряжения, МПа
Т-10 (92)	2600	20000	0,22	3	–
Смола ЭДТ-69Н	1160	3200	0,35	1,5	42

В работе [4] показано, что процесс отверждения препрега в условиях открытого космоса может длиться несколько часов. Все это время в надуваемых каркасных элементах необходимо поддерживать внутреннее давление, которое, очевидно, не может быть постоянным. Если предположить, что космическая конструкция может всегда быть расположена на солнечной стороне Земли, например, как космическая станция РОСС, то для полного отверждения всех оболочек ее надувных отверждаемых элементов возникает необходимость совершать вращательное движение конструкции, чтобы достигнуть необходимых значений температур во всех ее холодных участках.

В работе [5] показано, что оболочка из препрега может быть тонкой. В этом случае реально осуществить процесс надувания сложенной конструкции. Для этого не потребуется использовать высокое давление газа. Связующее препрега в оболочке будет нагреваться до температур, необходимых для осуществления горячего отверждения.

Результаты численного моделирования, проведенные в рамках данной работы, продемонстрировали, что одновременно с подачей внутреннего давления в отверждаемые пневмобалки можно рефлектор подвергать вращательному движению. При этом вращение рефлектора можно рассматривать не только с отвержденными, но и с неотвержденными пневмобалками. Показано, что существуют предельные значения скорости вращения пневмобалки, превышение которых нельзя допускать, так как это может привести к появлению в ней излома. Расчетные данные допустимых скоростей вращения опорных пневмобалок приведены в таблице 2. Внутреннее давление в неотвержденной пневмобалке достаточно задать равным 0,01 МПа. После завершения процесса отверждения препрега в опорных пневмобалках скорость вращения конструкции можно увеличить, чтобы завершить процесс отверждения в других не несущих пневмобалках. Например, допускается трехкратное увеличение скорости вращения при толщине стенки 0,75 мм. Подача внутреннего давления в них может быть завершена.

Таблица 2. Предельно допустимые скорости вращения основания пневмобалки, рад/с.

	Толщина стенки пневмобалки, мм		
	0,25	0,5	0,75
Внутреннее давление, МПа	Неотвержденная опорная пневмобалка, рад/с.		
0,01 (в неотвержденной пневмобалке)	1,13	1,65	1,55
	Отвержденная опорная пневмобалка, рад/с.		
0 (в отвержденной пневмобалке)	1,57	3,3	4,9

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта №С-26/1025.

Литература

- [1] Kondyurin A. Design and Fabrication of Large Polymer Constructions in Space – Amsterdam: Elsevier, 2022. – 630 p.
- [2] Shevtsov S., Zhilyaev I. V., Tarasov I., Wu J. K., Snezhina N. G. Model-based multi-objective optimization of cure process control for a large CFRP panel // Engineering Computations. 2018. Vol. 35. P. 1085-1097.
- [3] Демин Д. С., Кононенко П. И., Лебеденко В. И. и др. Концепция бортового радиолокатора на основе АФАР с использованием рефлектора с отверждаемым пневмокаркасом // Труды МАИ. 2021. № 119.
- [4] Елисеева А. Ю., Комар Л. А, Кондюрин А. В. Вычислительное моделирование отверждения каркаса надувной антенны спутника на околоземной орбите // Вычислительная механика сплошных сред. 2020. Т.13. №4. С.414-423.
- [5] Поморцева Т.Н., Комар Л.А. О возможности создания крупногабаритных конструкций в условиях открытого космоса // Вестник Пермского Университета. Математика. Механика. Информатика. 2023. Вып. 3 (62). С.64-75.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕРМОУСАЖИВАЕМОЙ ТРУБКИ ИЗ СШИТОГО ПОЛИПРОПИЛЕНА ДЛЯ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРУБ

Сметанников О.Ю.¹, Фасхутдинова Ю.Б.¹, Ильиных Г.В.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
sou2009@mail.ru, fub26@mail.ru, gleb@ilinyh.ru

Термоусаживаемые трубки (ТУТ) широко используются для изоляции соединения труб различного диаметра. В основе принципа их работы лежит эффект памяти формы: нагретую заготовку расширяют и охлаждают в новой конфигурации, затем готовое изделие надевают поверх соединения труб и нагревают, при этом изделие стремится приобрести свою первоначальную форму и размер [1]. В случае, когда на изолируемые трубы действует внутреннее давление, это обстоятельство способствует расширению труб и разгерметизации соединения, поскольку направление воздействия внутреннего давления в трубе противоположно направлению обжимающего давления ТУТ.

Возникла идея создать такие ТУТ, которые могли бы обеспечить герметизацию соединения труб с внутренней стороны. Необходимо спроектировать такую форму ТУТ, чтобы она помещалась внутрь труб, таким образом, ТУТ должна иметь соответствующие габариты. Одновременно с этим, благодаря памяти формы ТУТ при нагреве должна принимать форму кольца в поперечном сечении и прижиматься к внутренней стороне изолируемых труб, т.е. ее начальный внешний диаметр не должен быть меньше внутреннего диаметра трубы. В этом случае, направление внутритрубного давления совпадает по направлению с направлением давления ТУТ на внутреннюю поверхность трубы и дополнительно способствует уплотнению и герметизации. Для уменьшения габаритов ТУТ, изначально имеющей форму кольца в поперечном сечении, предлагается придать ей лепестковую форму. Сделать это можно при осаживании предварительно нагретого изделия на продолговатую матрицу подходящего профиля в поперечном сечении (рис.1).

Целью данного исследования является вычисление геометрических характеристик вышеуказанного профиля с учетом сохранения длины периметра ТУТ. Из данного условия следует условие постоянства длины ТУТ по средней линии. Для поиска геометрических характеристик (координат центров и радиусов выступов и впадин, огибающих матрицы) получено трансцендентное уравнение:

$$L_{fin}(R_1, R_2) = L_0 \quad (1)$$

где L_{fin} – длина средней поверхности огибающей, L_0 – длина средней поверхности исходной конфигурации, R_1, R_2 – радиусы выступов и впадин матрицы. Данное уравнение решено численно методом Ньютона. В результате найдены зависимости относительных радиусов от угла наклона прямого участка огибающей. Полученные зависимости аппроксимированы линейными функциями, для которых получены значения коэффициентов аппроксимирующих полиномов. В свою очередь, обнаружено, что данные коэффициенты также можно аппроксимировать линейными функциями. Также проиллюстрировано изменение расчетной формы заготовки в зависимости от коэффициента снижения габарита изделия для 6-ти лепестковой формы.

Для имитации получения заготовки проведено численное моделирование процесса осаживания ТУТ на матрицу в программном пакете Ansys. В качестве модели материала выбрана вязкогиперупругая модель, совмещающая свойства вязкоупругой модели Прони [2] и гиперупругой модели Огдена [3]. Пример корректирования материальных констант для согласования моделей приведен в работе [4].

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM- 2023-0006).

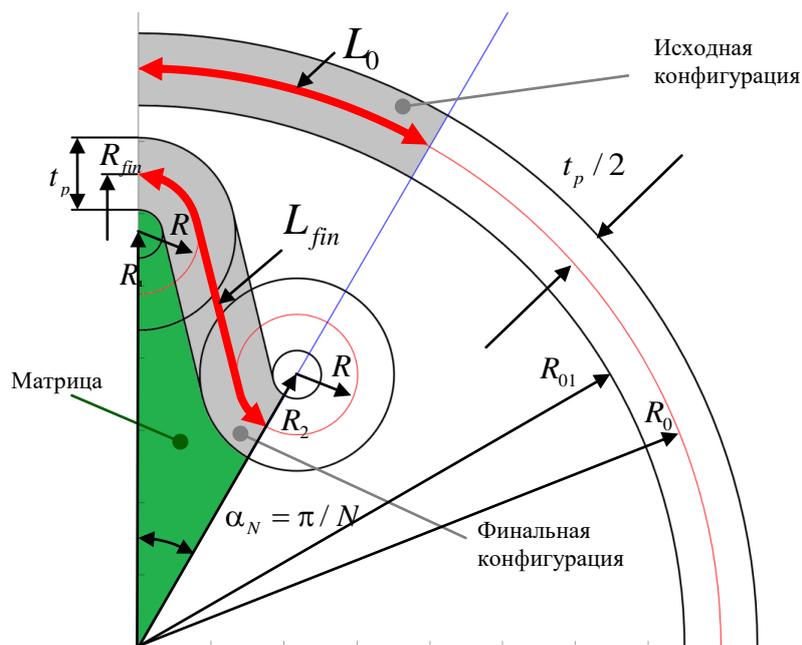


Рис. 1. Схема лепестковой формы заготовки

Литература

- [1] Smetannikov O. Yu., Faskhutdinova Yu. B., Subbotin E. V. ANSYS Study of the Shape-Memory Effect in Cross-Linked Polyethylene Products // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics – 2023, 63(7). – pp. 1138-1154. doi: 10.1134/S0021894422070112
- [2] Simo J. C. On fully three-dimensional finite strain viscoelastic damage model: Formulation and computational aspects // Computer Methods In Applied Mechechanics and Engineering – 1987, 60. – pp. 153-173.
- [3] Ogden R. W. Non-Linear Elastic Deformations. Ellis Horwood Ltd. – 1984. – 532 p.
- [4] Сметанников О.Ю., Ильиных Г.В., Фасхутдинова Ю.Б. Порядок идентификации термовязкоупругой модели шитого полиэтилена с учетом больших деформаций // Научно-технический вестник Поволжья – 2023 (12). – с. 110-115.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРМОУСАЖИВАЕМОЙ ТРУБКИ В КАЧЕСТВЕ ФИКСИРУЮЩЕГО ОРТЕЗА

Ильиных Г.В.¹, Сметанников О.Ю.¹, Фасхутдинова Ю.Б.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
gleb@ilinyh.ru, sou2009@mail.ru, fub26@mail.ru

Термоусаживаемые трубки (ТУТ) из сшитых полимеров находят широкое применение в различных сферах: авиационной промышленности, электротехники, медицины и др. [1]. ТУТ в основном используются в качестве соединяющей конструкции, но также могут выступать в качестве внешнего корпуса изделия. Данная работа посвящена исследованию применения ТУТ в качестве ортеза, фиксирующего положение повреждённого сустава или конечности. В частности рассмотрена фиксация забинтованного пальца руки человека, необходимость чего может возникнуть при закрытом переломе.

Характерным признаком сшитых полимеров является эффект памяти формы (ЭПФ) позволяющий запоминать физическое состояние и возвращаться к нему при воздействии температуры. ЭПФ в полимерах достигается посредством наличия релаксационного перехода, для описания которого в данной работе используется вязкоупругая модель Прони [2]. Помимо вязкоупругих свойств такие материалы проявляют и гиперупругие свойства (деформирование материала на 100% и более), позволяющие описывать нелинейное обратимое деформирование материала. Для описания такого поведения выбрана модель Огдена [3].

В работе поставлена задача определения свойств живой мягкой ткани пальца. Для этого разработана методика эксперимента измерения диаметра объекта при винтовой намотке ленты на него (см. рис. 1). На основе измеренных под различной нагрузкой (5–150 гр.) диаметров пальца получены диаграммы деформирования мягкой ткани. В качестве модели поведения материала принята мультилинейная упругая модель. Аналогичные эксперименты проведены для определения свойств бинта, намотанного на жесткую алюминиевую трубу.

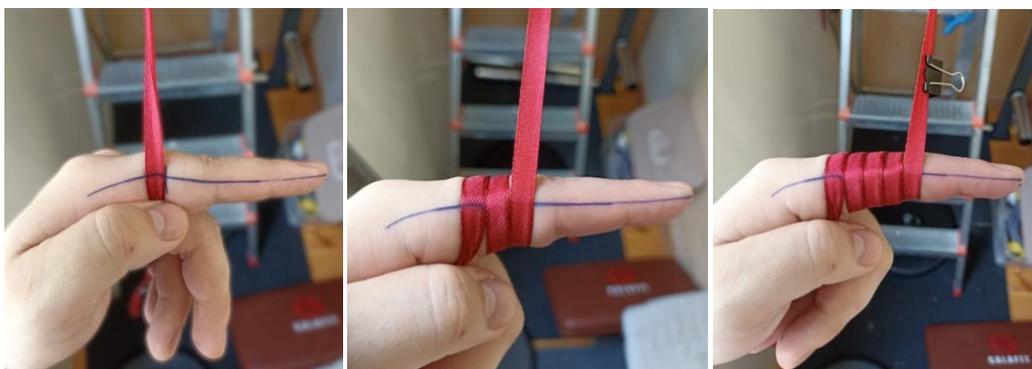


Рисунок 1 – Процесс винтовой намотки

В конечно-элементном пакете ANSYS Mechanical APDL проведено численное моделирование усадки ТУТ на забинтованный палец. На первом этапе моделируется производственный процесс нагрева и расширения трубки, формирующий в полимере «замороженные» деформации. Далее моделируется процесс усадки ТУТ на модель забинтованного пальца и определяется остаточное давление на палец. На основе полученной

геометрии сформированного в рассматриваемом процессе ортеза решается вспомогательная задача определения удельной изгибной жесткости ортеза – основной характеристики его эффективности. Получены данные об остаточном давлении и удельной изгибной жесткости ТУТ различных размеров.

Отмечено, что при усадке ТУТ может возникать давление более 18 кПа, при котором происходит частичное или полное перекрытие кровотока [4]. С целью снижения давления рассмотрены два варианта модификации ортеза. Первый вариант (см. рис. 2, а) предполагает использование перфорированной трубки, то есть по всей длине ортеза с заданной частотой вырезаются отверстия определённого размера. Проведены численные эксперименты с учётом различной перфорации трубок. Выявлены параметры, позволяющие минимизировать давление при сохранении жесткости ортеза. Второй вариант (см. рис. 2, б) предполагает использование дополнительного узкого полимерного вкладыша между бинтом и ТУТ. После процесса высокотемпературной усадки вкладыш извлекается, за счёт чего снижается остаточное давление. Исследованы вкладыши различной геометрии.

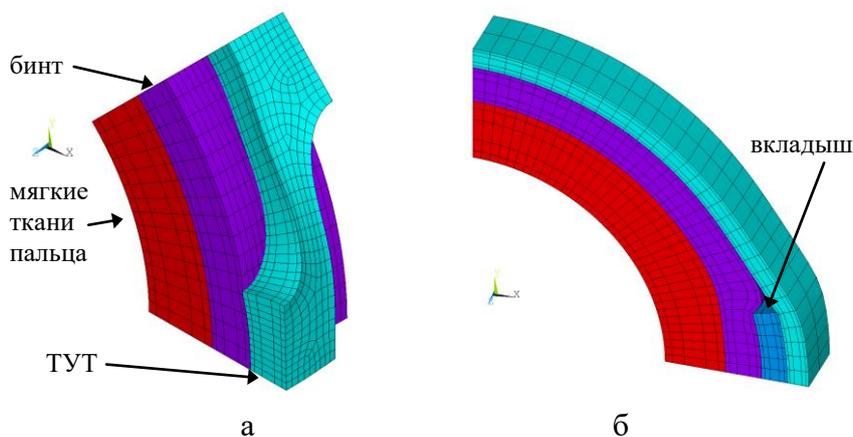


Рисунок 2 – Конечно-элементные аналоги задачи модификации ортеза.
а – перфорированная ТУТ, б – компенсирующий вкладыш

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0006).

Литература

- [1] Исеева О.А., Писарев М.С., Двирный В.В., Крушенко Г.Г. Перспективы применения полимеров с памятью формы в космической индустрии // Решетневские чтения. – 2018. – №1. – С.119–120.
- [2] Smetannikov O. Yu., Faskhutdinova Yu. B., Subbotin E. V. ANSYS Study of the Shape-Memory Effect in Cross-Linked Polyethylene Products // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics – 2023, 63(7). – pp. 1138-1154. doi: 10.1134/S0021894422070112
- [3] Ogden R. W. Large Deformation Isotropic Elasticity – On the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 1972. – №. 1567. – P. 565-584.
- [4] M. Wilk, M. Krzysztofik, A. Filip, R. G. Lockie, и A. Zajac, «The Acute Effects of External Compression With Blood Flow Restriction on Maximal Strength and Strength-Endurance Performance of the Upper Limbs», *Front. Physiol.*, т. 11, 2020, doi: 10.3389/fphys.2020.00567 .

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОКРЫТИЯХ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СОСТАВНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ТЕЛ С ВЫСОКОПОРИСТОЙ ОСНОВОЙ

Шейдаков Д.Н.¹, Лыжов В.А.¹, Турчин А.С.¹

¹Федеральный исследовательский центр Южный научный центр
Российской академии наук, Ростов-на-Дону
sheidakov@mail.ru

Проблема устойчивости равновесия деформируемых тел представляет значительный интерес, как с теоретической, так и с прикладной точки зрения, так как разрушение строительных и инженерных конструкций нередко происходит именно вследствие потери устойчивости под действием внешних нагрузок. При этом в связи с развитием современных технологий и появлением новых материалов актуальным становится вопрос анализа устойчивости многокомпонентных тел со сложной микроструктурой и внутренними напряжениями. Например, в аэрокосмической и автомобильной промышленности широко применяются различные конструкции из высокопористых материалов, таких как металлические и полимерные пены [1, 2]. Это обусловлено рядом их преимуществ: малый вес, высокая удельная прочность, возможность поглощать энергию. Такие конструкции, как правило, имеют составную структуру – пористая основа покрыта прочной и жесткой оболочкой. Это необходимо для защиты пены от воздействия окружающей среды, а также для оптимизации механических свойств при нагружении. Покрытие при этом часто содержит начальные (остаточные) напряжения, что может быть как побочным эффектом технологического процесса его нанесения, так и требуемым функциональным свойством.

Данная работа посвящена изучению устойчивости составных нелинейно-упругих сферических тел, которые являются распространенными элементами инженерных конструкций. Рассмотрена бифуркация равновесия сплошного составного шара при гидростатическом давлении и толстой трехслойной сферической оболочки при внутреннем и внешнем давлении. При этом предполагалось, что сердцевина шара и средний слой сферической оболочки (основа) выполнены из высокопористого материала, а внешний слой обоих тел и внутренний слой оболочки (покрытия) однородны, предварительно деформированы и содержат внутренние напряжения. Следует отметить, что поведение пористых материалов зачастую не может быть адекватно описано в рамках классической модели сплошной среды вследствие влияния микроструктуры. Эффективным способом ее учета является использование модели микрополярного тела [3–5], т.е. среды с моментными напряжениями и вращательным взаимодействием частиц. В связи с этим при моделировании составных сферических тел в настоящей работе применялся оригинальный подход [6]: для описания поведения высокопористой основы использовались определяющие уравнения нелинейного континуума Коссера, а поведение покрытий изучалось в рамках классической упругости. Ввиду того, что у составных тел с внутренними напряжениями отсутствует единая естественная (т.е. ненапряженная) отсчетная конфигурация, при постановке нелинейных задач о равновесии сплошного шара и толстой сферической оболочки с преднапряженными покрытиями использовался метод промежуточной отсчетной конфигурации и формула преобразования определяющих соотношений материала при изменении отсчетной конфигурации. Устойчивость исследовалась статическим методом

Эйлера. Для модели физически-линейного материала [7–9] получены системы линеаризованных уравнений равновесия, описывающие поведение рассмотренных составных сферических тел с высокопористой основой и преднапряженными однородными покрытиями в возмущенном состоянии. С помощью специальных подстановок на основе полиномов Лежандра анализ устойчивости этих тел сведен к решению линейных однородных краевых задач для систем обыкновенных дифференциальных уравнений. В результате численных расчетов для сплошного шара и толстой сферической оболочки найдены спектры критических значений параметров нагружения и соответствующие им моды выпучивания, а также построены области устойчивости. При этом подробно проанализировано влияние внутренних напряжений в покрытиях, а также их толщины и упругих свойств на бифуркации равновесия составных сферических тел с высокопористой основой.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00462, <https://rscf.ru/project/23-21-00462/>.

Литература

- [1] Gibson L.J., Ashby M.F. Cellular solids: structure and properties, 2nd Edition. – Cambridge, 1997. – 532 p.
- [2] Ashby M.F., Evans A.G., Fleck N.A., Gibson L.J., Hutchinson J.W., Wadley H.N.G. Metal foams: a design guide. – Boston, 2000. – 251 p.
- [3] Cosserat E., Cosserat F. Theorie des Corps Deformables. – Paris, 1909. – 242 p.
- [4] Пальмов В.А. Основные уравнения несимметричной теории упругости // Прикладная математика и механика. – 1964. – Т. 28., Вып. 3. – С. 401–408.
- [5] Eringen A.C. Microcontinuum Field Theory. I. Foundations and Solids. – New York, 1999. – 348 p.
- [6] Sheydaikov D.N., Lyzhov V.A. Stability of circular sandwich plate with porous core and prestressed uniform coatings // Advanced Structured Materials. Vol. 198. Advances in Linear and Nonlinear Continuum and Structural Mechanics. – Cham, 2023. – P. 443–459.
- [7] Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. – Москва, 1980. – 512 с.
- [8] Еремеев В.А., Зубов Л.М. Об устойчивости упругих тел с моментными напряжениями // Известия РАН. Механика твердого тела. – 1994. – Вып. 3. – С. 181–190.
- [9] Lakes R. Experimental methods for study of Cosserat elastic solids and other generalized elastic continua // Continuum models for materials with micro-structure. – New York, 1995. – P. 1–22.



ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОКОННОГО АРМИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ

Е.С. Лобов¹, А.А. Пепеляев¹, М.А. Ташкинов¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,
ESLobov@pstu.ru

В работе исследовалось влияние материалов наполнителя в виде короткого стекло- и углеволокна, а также непрерывных углеродных волокон на механические свойства полимерных. Образцы изготавливались методом аддитивного производства по технологии послойного наплавления термопластичного материала. В результате работы были получены экспериментальные данные в виде механических характеристик, а также их зависимости от при армировании волокнистым наполнителем. Установлено соотношение между модулем упругости и предельной деформацией, возникающее в результате армирования.

Армирование полимерной матрицы коротким волокном представляет собой создание композитного материала посредством внедрения в полимерный пруток рубленного волокна, например, углеродного (CF), стеклянного (GF) и др. волокна, механические свойства которого в значительной степени превосходят свойства полимера. В качестве полимерной матрицы исследуются акрилонитрил бутадиен стирол (ABS), полиэтилентерефталат-гликоль (PET-G) и полиамид 12 (PA12) [1][2]. Для каждого из них можно добиться увеличения прочностных свойств за счет армирования полимерной матрицы короткими или непрерывными волокнами, что приводит, в то же время, к уменьшению способности к пластическому деформированию. Еще один вариант армирования заключается в усилении детали непрерывным волокном. В общем случае, непрерывное армирующее углеродное волокно представляет собой плотный жгут из множества ультратонких углеродных монокристаллов, пропитанных полимерной матрицей. Материал непрерывных нитей аналогичен коротким волокнам. Использование непрерывного волокна позволяет достичь более высокого предела прочности и модуля упругости изделия, по сравнению с короткими волокнами.

Целью работы является получение экспериментальных результатов по одноосному статическому растяжению образцов, армированных коротким и непрерывным волокном, а также анализ влияния волоконного наполнителя на механические свойства полимерных материалов. Практической значимостью работы является получение экспериментальных данных при армировании полимерной матрицы волоконным наполнителем, а также оценка влияния наполнителя на механические свойства.

В исследовании было изучено два основных варианта армирования: матрица, наполненная коротким волокном CF или GF; матрица, наполненная коротким волокном, с дополнительным усилением CCF. На основе испытаний стандартных образцов (рис. 1) проведено сравнение с чистой матрицей. Обнаружены наиболее прочные комбинации материалов; определено, что материал PA12 приобретает наибольшее увеличение прочностных свойств при армировании в отношении к чистому материалу; установлено, что наиболее успешным армированием по соотношению приобретения прочностных и потере пластических свойств, являются материалы ABS и PET-G в случае усиления короткими и непрерывными волокнами соответственно, при этом PA12 является наименее эффективным.

Определен вклад армирования в изменение механических характеристик посредством сравнения модуля упругости армированного материала к чистому и предельной деформации чистого материала к армированному, с дальнейшим расчетом отношения первого ко второму, результатом чего является количественный эквивалент приобретённой жесткости и потерянной пластичности, представленный на рисунке 2.

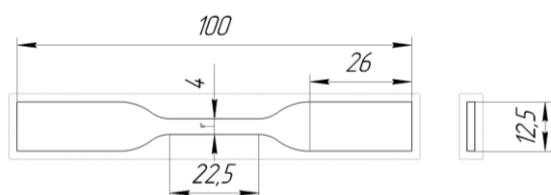


Рис. 1 Геометрия образцов для испытаний на растяжение соответствующего стандарту ISO 527-2:2012 (ГОСТ 11262 – 2017) [3]

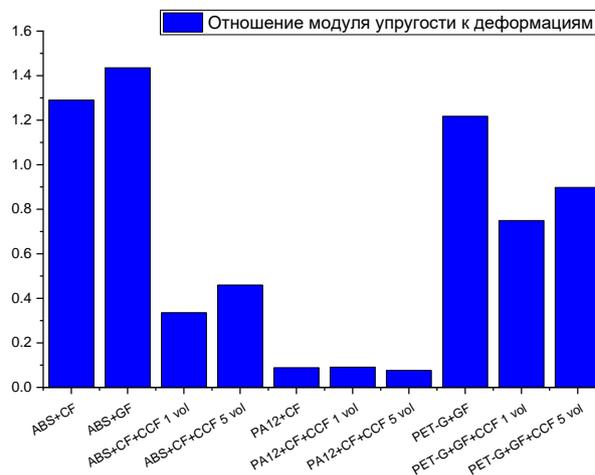


Рис. 2 Отношение модуля упругости к предельным деформациям

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10350).

Литература

- [1] A. Pepeliaev, E. Lobov, I. Vindokurov, and M. Tashkinov, 'Comparison of mechanical properties of 3D-printed ABS, PA12 and PET-G reinforced with short fiber', *Procedia Struct. Integr.*, vol. 61, no. 2023, p. 224–231, 2024, doi: 10.1016/j.prostr.2024.06.029.
- [2] Arora, S. Dua, V. K. Singh, S. K. Singh, and T. Senthilkumar, 'A comprehensive review on fillers and mechanical properties of 3D printed polymer composites', *Mater. Today Commun.*, vol. 40, no. June, p. 109617, 2024, doi: 10.1016/j.mtcomm.2024.109617.
- [3] ISO/TC 61/SC 2 Mechanical behavior, 'Plastics — Determination of tensile properties — Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics', *Ics 83.080.01*, vol. 2, p. 11, 2012, [Online]. Available: iso.org/standard/56046.html

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ЛИГАМЕНТОВ ТРАБЕКУЛЯРНОЙ КОСТНОЙ ТКАНИ И СКАФФОЛДОВ ДЛЯ ЕЕ ЗАМЕЩЕНИЯ

Шалимов А.С.¹, Ташкинов М.А.¹

¹ *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
Shalimov96@pstu.ru, M.Tashkinov@pstu.ru

В настоящее время использование искусственных заменителей поврежденных участков костной ткани является актуальной темой для обсуждения. Подбор геометрических и механических характеристик таких объектов – это одна из главных задач в данной области. Необходимо, чтобы имплант обладал подобным механическим поведением, что и оригинальный участок костной ткани, а также имел необходимую пористую геометрию для протекания процессов восстановления кости. Этой сферой занимается тканевая инженерия, которую в последние годы сочетают с аддитивным производством для послойного создания искусственных имплантатов.

Инженерия костной ткани занимается методами замены поврежденной кости путем разработки структур, заменяющих ее защитные и структурные функции, учитывая тот факт, что они должны выдерживать внутренние и внешние нагрузки, приложенные к человеческому телу. Одновременно с этим, разработанные конструкции должны обеспечивать деление клеток и производство новой костной ткани, что способствует заживлению кости. Такие конструкции называются скаффолдами, которые служат каркасом структуры. Скаффолды должны быть биосовместимыми, биорезорбируемыми и биодеградируемыми.

В данной работе были изучены представительные объемы трабекулярной кости – губчатой пористой ткани, встречающейся обычно на концах трубчатых костей и выполняющих поддерживающую и опорную функцию. Трабекулярную кость можно классифицировать как случайный двунепрерывный пористый материал открытого типа, в котором твердая фаза представляет собой взаимосвязанную сеть твердых пластин и связок, называемых лигаменатами. Геометрия исследуемых структур была получена с помощью сканов реальных трабекулярных костей, используя метод визуализации HR-pQCT (периферическая количественная компьютерная томография высокого разрешения). Было рассмотрено несколько различных моделей геометрии с неповторяющейся морфологией [1].

Многочисленные исследования продемонстрировали возможность использования полилактида (PLA) для изготовления скаффолдов для замещения трабекулярной костной ткани с помощью 3D-печати. Был выбран подход к моделированию пористых структур на основе генерации случайных двухфазных двунепрерывных пористых структур открытого типа, поскольку в разных местах трабекулярной кости морфология структуры будет разной. Геометрия исследуемых скаффолдов подбиралась таким образом, чтобы морфометрические параметры (такие как объемная доля и средняя толщина лигаментов) были сопоставимы с параметрами трабекулярных структур.

Геометрические модели структур соразмерных представительных объемов скаффолдов были созданы с помощью аналитического метода определения межфазной поверхности. Он базируется на условии, что если значение аналитической функции в точке меньше заданного

параметра разделения фаз, то эта точка принадлежит твердой фазе, а если больше – точка принадлежит пористой фазе. Для генерации геометрических моделей случайных двунепрерывных структур использовалась аналитическая функция случайных гауссовских полей, представляющая собой сумму косинусов со случайным аргументом [2].

Предполагается упругое линейное поведение материала твердой фазы. Структурам представительных объемов были присвоены свойства как трабекулярной кости, так и свойства PLA. Представительные объемы были закреплены за нижнюю грань, а к верхней была приложена перпендикулярная растягивающая нагрузка, выраженная в равномерном вертикальном смещении грани. Проводился конечно-элементный анализ без учета разрушения структур и с его учетом, при этом анализ разрушения проводился с помощью двух моделей разрушения: модели роста трещин и модели поврежденности. Для моделирования роста трещин использовался расширенный метод конечных элементов (XFEM) с применением подхода линейно-упругого разрушения в сочетании с техникой виртуального закрытия трещины (VCCT) и критерием разрушения Бензегга-Кенана, а для моделирования поврежденности – метод деградации упругих свойств.

Изучено механическое поведение и поведение при разрушении представительных объемов трабекулярных костей и скаффолдов с подобными морфометрическими параметрами. Исследовано влияние морфометрических параметров на напряженно-деформированное состояние двухфазных пористых структур. Для анализа разрушения структуры при моделировании роста трещин использовалась функция объемной доли конечных элементов лигаментов, разорванных трещиной, к общему объему лигаментов. Проведено сравнение эволюции разрушения в представительном объеме трабекулярной кости и скаффолдов.

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2023-0003).

Литература

- [1] Shalimov A., Smotrova E., Tashkinov M., Silberschmidt V.V. Effect of microstructure on trabecular-bone fracture: numerical analysis // *Procedia Structural Integrity*. – 2022. – Vol. 42. – № 2021. – P. 1153-1158.
- [2] Shalimov, A. Tashkinov M. Numerical investigation of damage accumulation and failure processes in random porous bicontinuous media // *Procedia Structural Integrity*. – 2020. – Vol. 25. – № 2019. – P. 386-393.
- [3] Elenskaya N.V., Tashkinov M.A., Silberschmidt V.V. Numerical Modeling of the Deformation Behavior of Polymer Lattice Structures with a Density Gradient Based on Additive Technologies // *Vestnik St. Petersburg University: Mathematics*. – 2022. – Vol. 55. – № 4. – P. 443-452.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ НАКЛАДКИ НА ПРОТЕЗНО-ОРТОПЕДИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ НЕДОСТАЮЩЕГО ЕСТЕСТВЕННОГО ОБЪЕМА ГОЛЕНИ ЧЕЛОВЕКА

Иванов Е.А., Зайцев А.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
a-zaitsev@mail.ru

Ежегодно в России порядка 22 тыс. человек получают технические средства реабилитации (протезы). В среднем выдается порядка 45–48 тыс. протезов в год. В последние годы российские компании начали активно замещать иностранных производителей, решая комплекс проблем реверсивного инжиниринга. У людей с ограниченной мобильностью из-за потери нижних конечностей при использовании технического средства реабилитации возникают ряд проблем, которые снижают качество жизни, приводят к дискомфорту, болевым ощущениям: неудобство в ношении одежды и спортивного инвентаря, повышенное внимание людей к человеку с протезом из-за бросающегося в глаза недостающего естественного объема голени. Для решения этой проблемы разрабатываются различные дополнения существующих протезно-ортопедических устройств, которыми являются комплекты функциональных накладок.

У стандартных накладок из вспененного полимера есть ряд критических недостатков. Из-за высокой пористости пенополиуретан впитывает влагу, в результате чего радикально ухудшается качество жизни. Инвалид с накладкой не может без последствий сходить в душ, не может заниматься плаванием, не может попасть под дождь. При изменении температуры тела повышается потоотделение. Влага, жирные кислоты и органические соединения, выделяемые с потом, накапливаются в накладке, утяжеляют протез. В пористой структуре с течением времени происходит бурный рост бактерий и грибков, появляется неприятный запах, возможно инфицирование организма и аллергические реакции. Это заставляет пациента отказаться от стандартных накладок из вспененного полимера. Кроме этого, при эксплуатации накладки из вспененного полимера не решается проблема неудобства при ношении одежды из-за несоответствия размера и формы по отношению к здоровой конечности человека. Это связано с тем, что мышцы в расслабленном и мобилизованном состоянии имеют разный объем, а конечность – разную внешнюю форму. Неизбежны утолщения в местах контакта культеприемника с накладкой, что ограничивает ношение обычной (привычной) одежды (например, slim-fit), а принципиальная невозможность учета анатомии конкретного человека приводит к появлению дискомфорта, в том числе, психологического. Кроме того, пациенту может потребоваться несколько комплектов накладок разной плотности для разных жизненных ситуаций. Поэтому разработка новых конструкций комплектов накладок на протезно-ортопедические устройства для компенсации недостающего естественного объема голени человека актуальна, востребована и практически значима.

Сформулированы эксплуатационные требования к комплекту функциональных накладок на протезно-ортопедическое устройство для компенсации недостающего естественного объема голени человека. Разработана новая конструкция персонализированного комплекта накладок, которая содержит новый вариант скрытого крепления к регулировочно-соединительному устройству протеза. Накладка тыльной и лицевой части голени крепятся неподвижно между собой с помощью магнитов. Разработана новая процедура создания персонализированной

геометрии по параметрам протезно-ортопедического устройства голени и здоровой конечности. Выбраны технология изготовления и материал для 3D-печати – филамент типа PETG. Решены задачи совместимости данных при использовании нескольких программных пакетов, необходимых для создания цифрового портрета комплекта функциональных накладок и проведения вычислительных экспериментов, моделирующих натурный эксперимент по нагружению на оснастке, проведена оценка прочности.

Проведение натурных экспериментов, в которых удастся провести мониторинг совместной работы лицевой и тыльной частей затруднен. Поэтому была спроектирована оснастка для статического, знакопеременного и ударного нагружения лицевой и тыльной частей по отдельности. Оснастка полностью воспроизводит условия реального взаимодействия элементов накладок с регулировочно-соединительным элементом протезно-ортопедического устройства голени и условия контакта с внешней поверхностью культеприемника. Для моделирования статического однократного нагружения частей комплекта накладок на разработанной оснастке сформулирована краевая задача, решение которой производилось численно методом конечных элементов в программном комплексе Ansys Workbench 19.

Вычислительные эксперименты по статическому нагружению частей комплекта накладок, моделирующие натурные испытания на оснастке, показали корректность задания граничных условий. Распределение интенсивности касательных напряжений были симметричны относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось симметрии регулировочно-соединительного устройства. Это свидетельствует о достоверности полученных результатов. Следует отметить, что задача индивидуализации была решена лишь частично. Удалось учесть естественную кривизну физиологически здоровой ноги лишь в боковой плоскости (перпендикулярна плоскости, проходящей через ось симметрии регулировочно-соединительного устройства). Однако, если будет проводиться полная индивидуализация геометрии, описанной выше симметрии полей интенсивности напряжений не будет. Области концентрации напряжений располагались в местах сочленения опоры магнитов и крепления и стенок накладок.

Одна из задач, которая возникает при проектировании комплекта накладок – минимизация массы конструкции. Поэтому в конструкцию крепления была введена система перфорационных цилиндрических полостей, геометрия и взаимное расположение которых не должны привести к появлению дополнительных концентраторов напряжений. Конструктивные решения, которые были рассмотрены: система 4 и 5 цилиндрических сквозных полостей одинакового и разного диаметра. Реализация этих конструктивных решений позволила получить выигрыш по массе комплекта накладок на 27,3 гр. (исходная масса – 293 гр.) без нарушения прочности крепления (коэффициент запаса – 1,52).

После проведения вычислительных экспериментов были изготовлены опытные образцы, которые подверглись натурным испытаниям при плавании, занятиях спортом (включая зимние виды). Испытания показали, что, несмотря на коэффициент запаса, равный 1,65 (определен для статического нагружения лицевой части комплекта накладок на оправке), знакопеременное нагружение, которое имело место быть при эксплуатации (не было учтено при проведении вычислительных экспериментов), привело к разрушению в области концентрации напряжений (место сочленения магнитной опоры и стенки лицевой накладки). Неудовлетворительный результат опытной эксплуатации потребовал проведение корректировки цифрового портрета комплекта накладок, в результате чего локально была увеличена толщина стенок и предусмотрены радиусы скругления в областях сочленения магнитной опоры и стенок. Масса комплекта накладок изменилась на 12,5 гр.

Представленные результаты получены в рамках выполнения работ по проекту СтС–411297 программы «Студенческий стартап» Фонда содействия инновациям.



СТАТИЧЕСКИЕ И ЦИКЛИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АДДИТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ И СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Ильиных А.В.¹, Паньков А.М.¹, Лыкова А.В.¹, Сивцева А.В.¹

¹ ФГАОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь

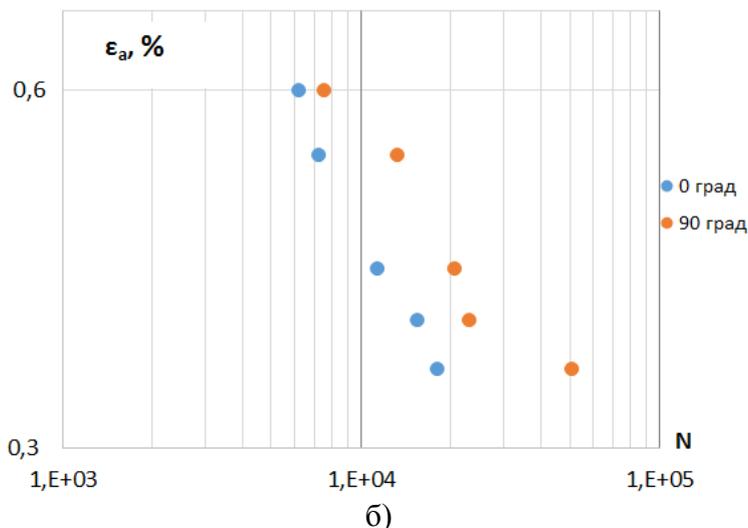
ilinih@yandex.ru

При производстве изделий в различных отраслях машиностроения методами аддитивных технологий в настоящее время применяются различные конструкционные стали и сплавы, пластики и керамики. Получаемые изделия имеют ряд существенных производственных недостатков, характерных для технологий послойного выращивания. Такими технологическими проблемами получаемых изделий могут быть пористость, наведенная текстура, анизотропия механических свойств и остаточные напряжения. Последующие операции постобработки (термическая обработка, горячее изостатическое прессование и т.п.) деталей из аддитивных материалов в значительной мере позволяют избавиться от этих проблем. В результате, например, остаточные напряжения и анизотропия механических свойств при растяжении в направлениях выращивания и формирования слоя могут быть значительно уменьшены. Однако остаточная межслоевая пористость и наведенная текстура оказывают влияние на характеристики сопротивления усталости аддитивных материалов [1-3].

Целью работы является проведение комплексных экспериментальных исследований конструкционных аддитивных материалов для сопоставления механических свойств при статическом и циклическом нагружении. В работе представлены результаты испытаний алюминиевого сплава AlSi10Mg (селективное лазерное сплавление, Самарский университет), ВТ6 и 316 LSi (проволочно-дуговая наплавка, ПНИПУ, Лаборатории методов создания и проектирования систем «материал-технология-конструкция») [4, 5]. Испытаниям были подвергнуты образцы, вырезанные (выращенные) под разными углами к плоскости формирования слоёв. Для примера на рисунке 1 представлены результаты экспериментов для нержавеющей стали 316 LSi. Из рисунка видно, что для аддитивной нержавеющей стали 316 LSi наибольшие значения статических характеристик наблюдаются у горизонтальных, вырезанных в плоскости формирования слоев образцов (0 градусов), а наилучшие характеристики сопротивления усталости наблюдаются у образцов (90 градусов), вырезанных в направлении выращивания [6, 7].

Для представленных аддитивных конструкционных материалов получены результаты сопоставления статических и циклических механических свойств при растяжении и кручении. Показано значительное влияние на циклическую долговечность ориентации образцов по отношению к направлению выращивания. Циклическая долговечность отличается более чем в 10 раз у образцов с «благоприятной» и «неблагоприятной» ориентацией. Анизотропия циклических свойств аддитивных материалов проявляется гораздо сильнее по сравнению с анизотропией упругих и пластических свойств при статическом нагружении.

Напр. вырезки	E , ГПа	$\sigma_{пл}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа
0 град	164	260	310
90 град	127	220	300
Коэф. анизотр.	23	15	3



а)

б)

Рисунок 1. Результаты статических (а) и циклических (б) испытаний при растяжении CMT-316 LSi

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 23-29-00900).

Литература

- [1] Cao, F., Zhang, T., Ryder, M.A. et al. A Review of the Fatigue Properties of Additively Manufactured Ti-6Al-4V. JOM 70, 349–357 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2728-5>
- [2] Hassanifard, S., Adibeig, M.R. & Hashemi, S.M. Determining strain-based fatigue parameters of additively manufactured Ti-6Al-4V: effects of process parameters and loading conditions. Int J Adv Manuf Technol 121, 8051–8063 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09907-5>
- [3] Rehmer, B., Bayram, F., Ávila Calderón, L.A. et al. Elastic modulus data for additively and conventionally manufactured variants of Ti-6Al-4V, IN718 and AISI 316 L. Sci Data 10, 474 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02387-6>
- [4] Microstructure and Properties of the 308LSi Austenitic Steel Produced by Plasma-MIG Deposition Welding with Layer-by-Layer Peening / T. Olshanskaya, D. Trushnikov, A. Dushina, A. Ganeev, A. Polyakov, I. Semenova // Metals. - 2022 - Vol. 12, Iss. 1, January. - Art. 82 - 14 p. - URL: www.mdpi.com/2075-4701/12/1/82/htm. - DOI 10.3390/met12010082.
- [5] Formation of Structure and Properties of Two-Phase Ti-6Al-4V Alloy during Cold Metal Transfer Additive Deposition with Interpass Forging / Y. Shchitsyn, M. Kartashev, E. Krivonosova, T. Olshanskaya, D. Trushnikov // Materials. - 2021 - Vol. 14, Iss. 16, August (II). - Art. 4415 - 18 p. - URL: www.mdpi.com/1996-1944/14/16/4415. - DOI 10.3390/ma14164415.
- [6] Ильиных А.В. Механические свойства стали 12X18H10T, полученной методом селективного лазерного сплавления // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2018. – № 55. – С. 103-109. DOI: 10.15593/2224-9982/2018.55.11
- [7] Экспериментальное исследование циклической долговечности аддитивного титанового сплава ВТ6 в условиях концентрации напряжений / А.В. Ильиных, А.М. Паньков, А.В. Лыкова, Г.Л. Пермяков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2023. – № 75. – С. 120–132. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.75.10

Научное издание

**Механика деформируемого твердого тела в проектировании
материалов и конструкций
Пермь, 7 – 8 ноября 2024 г.**

Программа и тезисы докладов

Издается в авторской редакции
Техническая подготовка и обработка материалов
Н.А. Юрлова

Подписано в печать 28.10.2024
Формат 60x84 1/16. Усл. п. л. 9,3. Тираж 120 экз.
Заказ 213/2024

«Институт механики сплошных сред
Уральского отделения Российской академии наук» - филиал
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Пермского федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской академии наук

614013. г. Пермь, ул. Академика Королева, д.1

Отпечатано в типографии «Новопринт»
Адрес: 614000, г. Пермь, ул. Седова, 7, оф. 110
Тел.: (342) 204 5 992