

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 конструкций

Программа и тезисы докладов

10-12 октября 2022 г.

Пермь, 2022

Механика деформируемого твердого тела в проектировании конструкций.
Пермь, 10 – 12 октября 2022г. Программа и тезисы докладов /ПФИЦ УрО
РАН. –Пермь, 2022. – 90 с.

Представлены программа и тезисы докладов конференции «Механика деформируемого твердого тела в проектировании 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 с 10 по 12 октября 2022 г.

Сборник отражает тематику конференции и содержит результаты исследований по актуальным проблемам вычислительной механики деформируемого твердого тела, механике композиционных и функциональных материалов, аэроупругости, электроупругости, 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.

Конференция проводится 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).

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, 2022 г.

© Авторы, 2022 г.



Научный комитет

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

Аннин Б.Д. (ИГ СО РАН, Новосибирск)
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)
Индейцев Д.А. (ИПМаш РАН, Санкт-Петербург)
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)
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)

Конференция проводится 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).

10 октября**понедельник**

9:45-10:00	Открытие конференции			
10:00 - 10:40	Пленарное заседание 1		Зал БОН	
10:40 – 11:00	Кофе-брейк			
11:00-13:00	Секционные заседания			
	Секция 1 / Заседание 1		Зал БОН	
13:00-14:00	Обед			
14:00-14:40	Пленарное заседание 2		Зал БОН	
14:40-15:00	Кофе-брейк			
15:00-17:00	Секционные заседания			
	Секция 1 / Заседание 2	Зал БОН	Секция 3 / Заседание 1	233 ауд.
17:20-18:30	Приветственный фуршет			

9:45 - 10:00 **Открытие работы конференции**

Стр.

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ 1

- | | | |
|---------------|--|----|
| 10:00 - 10:40 | Матвеев В.П. Теоретические и экспериментальные исследования, связанные с использованием smart-материалов | 19 |
| | <i>Докладчик: Матвеев Валерий Павлович</i> | |

СЕКЦИОННЫЕ ЗАСЕДАНИЯ

Секция 1 Вычислительная механика деформируемого твердого тела

Заседание 1

- | | | |
|---------------|--|----|
| 11:00 – 11:20 | Ведерников Д.В., Башкиров И.Г. Использование принципов декомпозиции полетных случаев нагружения планера СПС в рамках предварительного анализа прочности конструкции | 20 |
| | <i>Докладчик: Ведерников Дмитрий Вячеславович</i> | |
| 11:20 – 11:40 | Миргородский Ю.С., Чернов А.В., Фомин Д.Ю. Валидация инженерного метода нелинейного анализа прочности с использованием видеограммометрии | 21 |
| | <i>Докладчик: Миргородский Юрий Сергеевич</i> | |
| 11:40 – 12:00 | Дубовиков Е.А., Кондаков И.О., Левченков М.Д. Исследование нерегулярных сетчатых КСС для конструкции отсеков фюзеляжа | 22 |
| | <i>Докладчик: Левченков Михаил Дмитриевич</i> | |
| 12:00 – 12:20 | Попов В.П., Гунчин В.К., Устинов Б.Е., Корольский В.В. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния крыла прототипа сверхзвукового пассажирского самолета | 23 |
| | <i>Докладчик: Гунчин Виталий Константинович</i> | |
| 12:20 – 12:40 | Гунчин В.К., Устинов Б.Е., Рыманова А.Н., Титов Е.И., Больших А.А. Сравнительный анализ методик расчёта аэроупругого состояния крыла на основе методов дипольной решётки и двухсвязного численного моделирования | 24 |
| | <i>Докладчик: Устинов Богдан Евгеньевич</i> | |
| 12:40 – 13:00 | Игумнова В.С., Лукин А.В., Попов И.А. Разработка архитектуры и анализ нелинейной динамики резонансного дифференциального МЭМС-акселерометра | 25 |
| | <i>Докладчик: Игумнова Василиса Сергеевна</i> | |

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ 2

- | | | |
|---------------|--|----|
| 14:00 – 14:40 | Мансырев Д.Э., Полянский В.А., Яковлев Ю.А. Использование поверхностных эффектов накопления поврежденности для технической диагностики | 26 |
| | <i>Докладчик: Полянский Владимир Анатольевич</i> | |

СЕКЦИОННЫЕ ЗАСЕДАНИЯ

Секция 1 Вычислительная механика деформируемого твердого тела

Заседание 2

15:00 – 15:20	Ерофеев В.И., Ленин А.О., Лисенкова Е.Е., Царев И.С. Дисперсионные зависимости и особенности переноса энергии изгибными волнами в балке, лежащей на обобщенном упругом основании <i>Докладчик: Ерофеев Владимир Иванович</i>	27
15:20 – 15:40	Никитин И.С., Никитин А.Д. Математическое моделирование зарождения и роста усталостных квазитрещин при циклическом нагружении элементов авиационных конструкций <i>Докладчик: Никитин Александр Дмитриевич</i>	28
15:40 – 16:00	Словигов С.В., Бабушкин А.В. Исследование повреждаемости объемно-армированных углепластиков при квазистатическом сжатию <i>Докладчик: Словигов Станислав Васильевич</i>	29
16:00 – 16:20	Турбин Н.В., Шелков К.А. Расчетная оценка усталостной долговечности конструкции из композиционных материалов с использованием ограничений по допустимым деформациям <i>Докладчик: Шелков Кирилл Андреевич</i>	30
16:20 – 16:40	Сокоиков М.А., Симонов М.Ю., Чудинов В.В., Оборин В.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Изучение механизмов разрушения материалов локализованным сдвигом как результата скачкообразных процессов в дефектной структуре <i>Докладчик: Сокоиков Михаил Альбертович</i>	31
16:40 – 17:00	Лалин В.В., Лебедева А.А., Шакирова Р.М. Оптимизация напряженного состояния упругих систем с помощью краевых нагрузок <i>Докладчик: Лалин Владимир Владимирович</i>	32

Секция 3 Мониторинг деформационного поведения конструкций

Заседание 1

15:00 – 15:20	Анджикович И. Е., Калинин В.В., Коновалов С.М., Турчин А.С. Низкочастотный мониторинг напряженного состояния и наличия дефектов в материалах и конструкциях <i>Докладчик: Калинин Валерий Владимирович</i>	33
15:20 – 15:40	Матвеев В.П., Кошелева Н.А., Сероваев Г.С., Федоров А.Ю. Численная оценка погрешности деформаций, измеряемых волоконно-оптическими датчиками на основе брэгговских решеток <i>Докладчик: Кошелева Наталья Александровна</i>	34

15:40 – 16:00	Матвеев В.П., Кошелева Н.А., Сероваев Г.С. Результаты и особенности измерения деформаций при помощи точечных и распределенных волоконно-оптических датчиков <i>Докладчик: Сероваев Григорий Сергеевич</i>	35
16:00 – 16:20	Шардаков И.Н., Шестаков А.П., Глот И.О., Епин В.В., Гусев Г.Н., Цветков Р.В. Оценка нелинейной зависимости показаний решетки Брегга от температуры и деформации на основе экспериментальных данных <i>Докладчик: Шестаков Алексей Петрович</i>	36
16:20 – 16:40	Никифоров А.С., Баранов М.А., Шипунов Г.С. Мониторинг деформированного состояния конструкции трубы из ПКМ с применением волоконно-оптических датчиков <i>Докладчик: Никифоров Александр Сергеевич</i>	37
16:40 – 17:00	Гусев Г.Н. Особенности деформационного поведения строительных конструкций, армированных полимерной композиционной арматурой <i>Докладчик: Гусев Георгий Николаевич</i>	38

11 октября**вторник**

10:00 - 10:40	Пленарное заседание 3		Зал БОН	
10:40 – 11:00	Кофе-брейк			
11:00-13:00	Секционные заседания			
	Секция 1 / Заседание 3	Зал БОН	Секция 2 / Заседание 1	233 ауд.
13:00-14:00	Обед			
14:00-14:40	Пленарное заседание 4		Зал БОН	
14:40-15:00	Кофе-брейк			
15:00-17:00	Секционные заседания			
	Секция 1 / Заседание 4	Зал БОН	Секция 2 / Заседание 2	233 ауд.
19:00 – 22:00	Товарищеский ужин Ресторан АМАКС Пермь, ул. Монастырская, 43,			

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ 3

- | | | |
|---------------|--|----|
| 10:00 - 10:40 | Чернышев С.Л., Матвеев В.П., Зиченков М.Ч., Шаныгин А.Н., Дубовиков Е.А. Исследование эффективности использования про-бионических конструкций для сверхзвукового пассажирского самолета (СПС) с низким уровнем звукового удара | 39 |
| | <i>Докладчик: Шаныгин Александр Николаевич</i> | |

СЕКЦИОННЫЕ ЗАСЕДАНИЯ**Секция 1 Вычислительная механика деформируемого твердого тела***Заседание 3*

- | | | |
|---------------|--|----|
| 11:00 – 11:20 | Тимошенко П.Е., Широков В.Б., Калинин В.В. ПАВ датчик деформации на тонкой пленке BST | 40 |
| | <i>Докладчик: Тимошенко Павел Евгеньевич</i> | |
| 11:20 – 11:40 | Беляев А.К., Полякова О.Р., Товстик Т.П. Расчёт устойчивости двухзвенного маятника Капицы | 41 |
| | <i>Докладчик: Товстик Татьяна Петровна</i> | |
| 11:40 – 12:00 | Можгова Н.В., Лукин А.В., Попов И.А. Моделирование импульсного электродинамического излучателя цилиндрического типа | 42 |
| | <i>Докладчик: Можгова Надежда Вячеславовна</i> | |
| 12:00 – 12:20 | Кислицын В.Д., Шадрин В.В., Свистков А.Л., Мохирева К.А. Описание эффекта размягчения эластомерных композитов в экспериментах с возрастающей амплитудой деформирования | 43 |
| | <i>Докладчик: Кислицын Василий Дмитриевич</i> | |
| 12:20 – 12:40 | Андрюкова В.Ю., Тарасов В.Н. Контактная задача для кольца, подкрепленного упругими тонкими стержнями, находящегося под действием весовой нагрузки | 44 |
| | <i>Докладчик: Андрюкова Вероника Юрьевна</i> | |
| 12:40 – 13:00 | Зайцев А.В., Кокшаров В.С., Фукалов А.А. Закономерности коллективных взаимодействий в ансамбле включений и условия перехода к локализованному разрушению однонаправленно армированных волокнистых композитов | 45 |
| | <i>Докладчик: Зайцев Алексей Вячеславович</i> | |

Секция 2 Механика композиционных и функциональных материалов*Заседание 1*

- | | | |
|---------------|---|----|
| 11:00 – 11:20 | Гришин В.И., Марескин И.В. Оценка эффективности гибридных конструкций крыла на основе однонаправленных композитных структур | 46 |
| | <i>Докладчик: Марескин Иван Владимирович</i> | |

11:20 – 11:40	Гавва Л.М., Митрофанов О.В., Фирсанов В.В. Выбор поверхности приведения для оптимального проектирования конструктивно-анизотропных панелей летательных аппаратов из композиционных материалов с ограничениями по уточнённой теории устойчивости	47
	<i>Докладчик: Гавва Любовь Михайловна</i>	
11:40 – 12:00	Шипунов Г.С. Исследования особенностей механического поведения лопатки из полимерного композиционного материала с дефектами	48
	<i>Докладчик: Шипунов Глеб Сергеевич</i>	
12:00 – 12:20	Пузырецкий Е.А., Шабалин Л.П., Халиулин В.И., Петров П.А. Теоретико-экспериментальное исследование гибридной композит-металлической лопасти винта с интегрированными волокнами и технологии ее изготовления	49
	<i>Докладчик: Пузырецкий Евгений Александрович</i>	
12:20 – 12:40	Халиулин В.И., Шабалин Л.П., Батраков В.В., Пузырецкий Е.А. Расчет процессов 3D печати композитной оснастки и трансферного формования сетчатых конструкций	50
	<i>Докладчик: Шабалин Леонид Павлович</i>	
12:40 – 13:00	Миронихин А.Н. Постановка и решение задачи оптимального проектирования многослойной оболочки при термосиловом нагружении с заданным уровнем надёжности и учётом статистических разбросов физико-механических свойств материалов слоёв	51
	<i>Докладчик: Миронихин Андрей Николаевич</i>	

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ 4

14:00 – 14:40	Васильев В.В., Лурье С.А. Проблема сингулярности решений в прикладной механике и математике	52
	<i>Докладчик: Лурье Сергей Альбертович</i>	

СЕКЦИОННЫЕ ЗАСЕДАНИЯ

Секция 1 Вычислительная механика деформируемого твёрдого тела

Заседание 4

15:00 – 15:20	Келлер И.Э., Трушников Д.Н., Баяндин Ю.В., Дудин Д.С., Салихова Н.К., Казанцев А.В., Осколков А.А., Пермяков Г.Л., Карташев М.Ф. Искажения, микроструктура и прочность металлического сегмента, выращенного проволоочно-дуговой наплавкой с послойной проковкой	53
	<i>Докладчик: Келлер Илья Эрнстович</i>	

15:20 – 15:40	Леканов М.В., Майер А.Е. Использование машинного обучения для описания упругопластического течения металла в конечных деформациях <i>Докладчик: Леканов Михаил Васильевич</i>	54
15:40 – 16:00	Шарифуллина Э.Р., Швейкин А.И., Трусов П.В. Многоуровневые конститутивные модели для описания сверхпластического деформирования алюминиевых сплавов: учет легирующих добавок <i>Докладчик: Шарифуллина Эльвира Ривгатовна</i>	55
16:00 – 16:20	Красников В.С., Майер А.Е., Фомин Е.В., Погорелко В.В., Безбородова П.А., Латыпов Ф.Т., Эбель А.А. Многомасштабное моделирование высокоскоростной пластичности сплавов алюминия с медью <i>Докладчик: Красников Василий Сергеевич</i>	56
16:20 – 16:40	Бормотин К.С., Потянихин Д.А., Мин Ко Хлайнг, Синельщиков А.А. Расчет формы инструмента для раздачи средней части трубы по жесткой матрице <i>Докладчик: Потянихин Дмитрий Андреевич</i>	57
16:40 – 17:00	Одинокое В.И., Дмитриев Э.А., Потянихин Д.А., Евстигнеев А.И., Квашнин А.Е. Моделирование технологического процесса получения непрерывных металлоизделий на литейно-ковочном модуле с одним подвижным бойком <i>Докладчик: Квашнин Александр Евгеньевич</i>	58

Секция 2 Механика композиционных и функциональных материалов

Заседание 2

15:00 – 15:20	Мохирева К.А., Свистков А.Л., Шадрин В.В., Соколов А.К., Возняковский А.П. Механическое поведение полиуретановых композитов с наноразмерными наполнителями <i>Докладчик: Мохирева Ксения Александровна</i>	59
15:20 – 15:40	Ковтунов С.С., Насонов Ф.А., Турбин Н.В. Исследование механических характеристик конструкционных ПКМ, модифицированных одностенными углеродными нанотрубками <i>Докладчик: Ковтунов Сергей Сергеевич</i>	60
15:40 – 16:00	Беляев А.Ю., Изюмов Р.И., Свистков А.Л. Влияние поверхностного заряда на формирование рельефа карбонизированного слоя на поверхности полимера при ионно-плазменной обработке <i>Докладчик: Беляев Антон Юрьевич</i>	61
16:00 – 16:20	Муллахметов М.Н., Лобанов Д. С., Янкин А.С. Применение теории критических расстояний для оценки влияния структурных дефектов на механическое поведение композитов <i>Докладчик: Муллахметов Максим Николаевич</i>	62

- | | | |
|---------------|---|----|
| 16:20 – 16:40 | Пестренин В.М., Пестренина И.В., Фагалов А.Р., Пелевин А.Г.
Представительный объем и эффективные материальные характеристики периодических и статистически однородно армированных волоконных композитов
<i>Докладчик: Пестренина Ирина Владимировна</i> | 63 |
| 16:40 – 17:00 | Иванов Я.Н., Чудинов В. С., Шардаков И. Н., Беляев А. Ю., Морозов И. А. Механические свойства и морфология поверхности углеродного слоя, сформированного на поверхности полиуретана ионно-плазменной обработкой при разных углах имплантации ионов
<i>Докладчик: Иванов Ярослав Николаевич</i> | 64 |

12 октября**среда**

10:00 - 10:40	Пленарное заседание 5		Зал БОН	
10:40 – 11:00	Кофе-брейк			
11:00-13:00	Секционные заседания			
	Секция 1 / Заседание 5	Зал БОН	Секция 2 / Заседание 3	233 ауд.
13:00-14:00	Обед			
14:00-14:40	Пленарное заседание 6		Зал БОН	
14:40-15:00	Кофе-брейк			
15:00-17:00	Секционные заседания			
	Секция 1 / Заседание 6	Зал БОН	Секция 2 / Заседание 4	233 ауд.
17:00 – 17:15	Закрытие конференции			

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ 5

- 10:00 - 10:40 Сапожников С.Б. Ударная прочность композитных материалов: проблемы и решения 65

Докладчик: Сапожников Сергей Борисович

СЕКЦИОННЫЕ ЗАСЕДАНИЯ**Секция 1 Вычислительная механика деформируемого твердого тела****Заседание 5**

- 11:00 – 11:20 Зверев Н.А., Земсков А.В. Моделирование нестационарных механодиффузионных возмущений в ортотропном полем цилиндра с учетом релаксации диффузионных потоков 66

Докладчик: Зверев Николай Андреевич

- 11:20 – 11:40 Дудин Д.С., Келлер И.Э. Связанные модели взаимной диффузии и вязкоупругого деформирования 67

Докладчик: Дудин Дмитрий Сергеевич

- 11:40 – 12:00 Безбородова П.А, Красников В.С., Майер А.Е. Влияние атомов водорода на напряжение течения в Al-Cu сплаве 68

Докладчик: Безбородова Полина Александровна

- 12:00 – 12:20 Комар Л.А., Кондюрин А.В., Свистков А.Л., Терпугов В.Н. Математическая модель кинетики химической реакции полимеризации эпоксидной смолы ЭД-20 и триэтилентетрамина в условиях открытого космоса с учетом испарения компонентов с низкой молекулярной массой 69

Докладчик: Комар Людмила Андреевна

- 12:20 – 12:40 Пестренин В.М., Пестренина И.В., Ландик Л.В., Кондюрин А.В. Феноменологическое кинетическое уравнение конверсии связующего композиционных материалов на основе изотермических испытаний 70

Докладчик: Пестренин Валерий Михайлович

- 12:40 – 13:00 Кондюрин А.В., Пелевин А.Г., Поморцева Т.Н., Свистков А.Л., Терпугов В.Н. Анализ механических свойств препрегов плотняного строения для определения перспектив их использования в качестве элементов надуваемых конструкций, отверждаемых в космосе 71

Докладчик: Пелевин Александр Геннадьевич

Секция 2 Механика композиционных и функциональных материалов**Заседание 3**

- 11:00 – 11:20 Скубов Д.Ю., Индейцев Д.А., Удалов П.П., Попов И.А., Лукин А.В., Полеткин К.В. Нелинейная динамика микромеханического твердотельного неконтактного электромагнитного индукционного подвеса 72

Докладчик: Удалов Павел Павлович

11:20 – 11:40	Белянкова Т.И., Ворович Е.И., Калинин В.В. Особенности распространения sh -волн в двухслойной структуре из неоднородных пьезоэлектрического и диэлектрического слоев <i>Докладчик: Белянкова Татьяна Ивановна</i>	73
11:40 – 12:00	Ошмарин Д.А. Примеры приложения задач о собственных и вынужденных установившихся колебаниях для поиска параметров внешних электрических цепей (он-лайн) <i>Докладчик: Ошмарин Дмитрий Александрович</i>	74
12:00 – 12:20	Каменских А.О., Лекомцев С.В., Матвеев В.П., Судаков А.И. Пассивная система демпфирования резонансных колебаний на основе пьезоэлементов, соединённых с внешней электрической цепью <i>Докладчик: Каменских Александр Олегович</i>	75
12:20 – 12:40	Лекомцев С.В., Матвеев В.П., Сенин А.Н. Анализ собственных колебаний и устойчивости электромеханических систем, взаимодействующих с текущей жидкостью <i>Докладчик: Лекомцев Сергей Владимирович</i>	76
12:40 – 13:00	Ошмарин Д.А., Юрлова Н.А., Севодина Н.В. Эффективность применения различных механизмов диссипации энергии для повышения демпфирующих характеристик оболочки <i>Докладчик: Юрлова Наталия Алексеевна</i>	77

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ 6

14:00 – 14:40	Фрейдин А.Б. Связанные задачи механохимии: постановка и решения <i>Докладчик: Фрейдин Александр Борисович</i>	78
---------------	--	----

СЕКЦИОННЫЕ ЗАСЕДАНИЯ

Секция 1 Вычислительная механика деформируемого твердого тела

Заседание 6

15:00 – 15:20	Кабанова П.К., Фрейдин А.Б. Численное исследование межфазных границ в упругом теле <i>Докладчик: Кабанова Полина Константиновна</i>	79
15:20 – 15:40	Кондратьев Н.С., П.В. Трусов, Подседерцев А.Н., Балдин М.Н. Многоуровневая расширенная статистическая модель для описания коалесценции субзерен <i>Докладчик: Кондратьев Никита Сергеевич</i>	80
15:40 – 16:00	Головина Н.Я., Белов П.А. Вариационный принцип, позволяющий моделировать кривые деформирования упругопластических материалов <i>Докладчик: Головина Наталья Яковлевна</i>	81

16:00 – 16:20	Федоров А.Ю., Матвеев В.П., Галкина Е.Б. Численные исследования сингулярности напряжений в окрестности точки пересечения фронтов трёхмерных трещин <i>Докладчик: Федоров Андрей Юрьевич</i>	82
16:20 – 16:40	Недин Р.Д., Юров В.О. О реконструкции предварительных напряжений в неоднородном цилиндре <i>Докладчик: Юров Виктор Олегович</i>	83
16:40 – 17:00	Земсков А.В., Ле В.Х. Нестационарные термоупруго-диффузионные колебания балки Бернулли-Эйлера под действием распределенной поперечной нагрузки (он-лайн) <i>Докладчик: Земсков Андрей Владимирович</i>	84

Секция 2 Механика композиционных и функциональных материалов

Заседание 4

15:00 – 15:20	Хазов П.А., Ерофеев В.И. Экспериментальные исследования прочности и устойчивости трубобетонных образцов малогабаритных сечений <i>Докладчик: Хазов Павел Алексеевич</i>	85
15:20 – 15:40	Вильдеман В.Э., Мугатаров А.И., Лунегова Е.М., Староверов О.А., Струнгарь Е.М. Стабилизация процесса закритического деформирования углепластиков в условиях разгрузок и вибраций при сдвиге <i>Докладчик: Староверов Олег Александрович</i>	86
15:40 – 16:00	Струнгарь Е.М., Лобанов Д.С. Анализ процессов деформирования и разрушения композитов с концентраторами при сложных режимах внешних воздействий <i>Докладчик: Струнгарь Елена Михайловна</i>	87
16:00 – 16:20	Бахматов П.В., Старцев Е.А. Исследование свойств наплавленных швов и покрытий полученных с использованием сварочных материалов созданных на основе техногенных отходов металлургических предприятий <i>Докладчик: Старцев Егор Андреевич</i>	88
16:20 – 16:40	Ильиных А.В., Струнгарь Е.М., Паньков А.М., Трушников Д.Н., Пермьяков Г.Л. Экспериментальное исследование механических свойств образцов и стержневых конструкций, изготовленных методом плазменной наплавки из нержавеющей стали 316 LSi <i>Докладчик: Ильиных Артем Валерьевич</i>	89
16:40 – 17:00	Романов К.А., Швейкин А.И., Трусов П.В. Описание измельчения зеренной структуры при равноканальном угловом прессовании меди с помощью двухуровневой конститутивной модели <i>Докладчик: Романов Кирилл Андреевич</i>	90

17:00 – 17:15 **ЗАКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ**

Тезисы докладов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SMART-МАТЕРИАЛОВ

Матвеев В.П.¹

¹Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь
mvp@icmm.ru

Smart-материалы подобно материалам биологических объектов должны функционально изменять свои свойства в зависимости от состояния окружающей среды. В общем случае они представляют собой композитные структуры, включающие сенсорные элементы, исполнительные элементы и элементы обработки информации.

В обзорном докладе в качестве актуаторов рассматриваются пьезоэлектрические материалы и материалы с памятью формы, а в качестве сенсоров — пьезоэлектрические и оптоволоконные датчики. При использовании актуаторов рассматриваются задачи управления геометрией конструкций и задачи управления динамическими характеристиками. При использовании smart-материалов с сенсорами рассматриваются задачи регистрации характеристик деформационного поведения конструкции.

Для smart-материалов на основе пьезоэлементов разработаны математические постановки задач о квазистатическом деформировании, собственных и вынужденных установившихся колебаниях конструкций. При наличии электродированных поверхностей у пьезоэлементов к ним могут быть подключены электрические цепи различной архитектуры, состоящие из резисторов, ёмкостей и индуктивностей. Эти элементы, являясь в механических процессах электрическими аналогами вязкости, упругости, массы, расширяют спектр параметров, влияющих на динамические процессы. В рассматриваемые композиты могут быть включены элементы из электропроводящих материалов, в частности графеновых композитов, которые при наличии электродированных поверхностей могут играть роль резисторов, реализуя дополнительный диссипативный механизм. Для перечисленных выше математических постановок механических задач разработаны алгоритмы численной реализации на основе метода конечных элементов с использованием подпрограмм из коммерческих пакетов, авторских подпрограмм. Разработанные методы апробированы на модельных задачах.

В разделе исследований, связанных со smart-материалами на основе материалов с памятью формы, разрабатываются методы и алгоритмы для расчёта формоизменения элементов конструкций за счёт использования одномерных элементов из материалов с памятью формы, встроенных в материал или фиксируемых на поверхности объекта. С помощью методов математического моделирования проанализирована возможность изменения спектра собственных частот колебаний при локальных механических воздействиях, вызывающих дополнительные напряжения и деформации. Такого рода воздействия могут быть результатом реализации эффекта памяти формы или пьезоэлектрического эффекта.

Для варианта smart-систем, наделённых сенсорами, получены теоретические и экспериментальные результаты, обеспечивающие обоснованное использование волоконно-оптических датчиков деформаций, встраиваемых в материал или фиксируемых на его поверхности.

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).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ДЕКОМПОЗИЦИИ ПОЛЕТНЫХ СЛУЧАЕВ НАГРУЖЕНИЯ ПЛАНЕРА СПС В РАМКАХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ.

Ведерников Д.В.¹, Башкиров И. Г.¹

ФАУ «ЦАГИ» г Жуковский

Определение критических параметров нагружения конструкции при взаимодействии самолёта с аэродинамическим потоком, является одним из наиболее трудоёмких этапов процедуры предварительного проектирования планера пассажирского самолёта. Что касается СПС, то с учётом расширения диапазона допустимых режимов полёта за счёт сверхзвуковой области, эта задача существенно усложняется, поскольку анализ факторов нагружения действующих на конструкцию самолёта требует проведения значительно большего количества расчётных исследований с использованием численных прочностных и аэродинамических моделей. С целью снижения трудоёмкости определения критических параметров нагружения для конструкции СПС был разработан быстрый и надёжный метод поиска критических случаев нагружения. Основой для данного метода стал четырёхуровневый алгоритм анализа прочности [1], разработанный ранее в ЦАГИ для проектировочных исследований нетрадиционных конструкций дозвуковых самолётов, в рамках нетрадиционных компоновочных схем. Этот алгоритм был адаптирован для анализа прочности и внешних нагрузок СПС.

В рамках новой версии четырёхуровневого алгоритма был разработан программный модуль («модуль СПС»), реализующий принцип декомпозиции полётных случаев нагружения, позволяющий значительно снизить трудоёмкость вычислительного процесса. Данный принцип был успешно валидирован для традиционных конструкций гражданских самолётов [2], и эти результаты были использованы в процессе валидации «модуля СПС». В рамках программного модуля «СПС» имеется возможность построения в автоматизированном режиме параметрической аэродинамической модели СПС с переменной размерностью расчётной сетки в рамках итерационной процедуры расчёта аэродинамических нагрузок. Такое свойство дискретной аэродинамической модели в сочетании с аналогичным свойством прочностной МКЭ модели позволяет значительно повысить быстродействие процедуры поиска расчётных случаев нагружения при большом количестве альтернативных вариантов, за счёт выбора рациональной согласованной размерности расчётных моделей (аэродинамической и прочностной).

Результаты валидационных исследований показали, что снижение трудоёмкости вычислительных процедур анализа прочностных и весовых характеристик самолёта СПС, составило не менее 10 раз.

Публикация подготовлена в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020-2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 17.05.2022 г. № 075-15-2022-1023).

Литература

- [1] Shanygin A, Fomin V, Zamula G. 4th-level approach for strength and weight analyses of composite airframe structures. In: Proceedings of the 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Nice, France, 19-24 September 2010.
- [2] Migorodskii, Y.S.; Levchenkov, M.D.; Shanygin, A.N.; Vedernikov, D.V. Strength Analysis of Alternative Airframe Layouts of Regional Aircraft on the Basis of Automated Parametrical Models. Aerospace 2021, 8, 80. <https://doi.org/10.3390/aerospace8030080>

ВАЛИДАЦИЯ ИНЖЕНЕРНОГО МЕТОДА НЕЛИНЕЙНОГО АНАЛИЗА ПРОЧНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИДЕОГРАММОМЕТРИИ

Миргородский Ю.С.¹, Чернов А.В.¹, Фомин Д.Ю.¹

¹ФАУ «ЦАГИ», Жуковский
mirgorodskii@phystech.edu

Одной из проблем создания металло-композитных конструкций нового поколения на основе однонаправленного силового каркаса и металлических рамных конструкций будет разработка легких и надежных стыковочных узлов. Большинство стыковочных узлов, широко используемых для металлических конструкций, оказываются малоэффективны в организации металло-композитного стыка, из-за особенностей современных композиционных материалов, применяемых в высоконагруженных силовых конструкциях планера. При организации данных типов соединений в композитных конструкциях происходит нарушение целостности силовых волокон, что ведет к исключению из работы большей части силовой конструкции.

В результате поиска новых конструктивных решений для стыков предложены новые перспективные концепции металло-композитных стыков [1], позволяющие значительно эффективнее реализовать потенциал композитных материалов в стыковочных узлах. Исследования, проведенные в работе [2], показали эффективность нового поколения металло-композитных стыков, однако, выявили ряд особенностей нагружения таких конструкций, требующих использование нелинейного подхода к анализу прочности и проектированию подобных конструкций. Необходимость использования нелинейных расчетных моделей МКЭ для подобных задач связана с наличием высоких градиентов напряжений, которые в рамках линейных методов анализа прочности приводят к значительным погрешностям в вычислениях запасов прочности. В данной работе представлены результаты исследования прочности конструкции стыков нового поколения с использованием нелинейного инженерного метода, предназначенного для начального этапа проектирования. Исследования показали, что данный метод позволяет эффективно (оперативно и с высокой точностью) проводить анализ прочности сложных стыковочных узлов без значительного увеличения трудоемкости. Метод учитывает физическую и геометрическую нелинейности. В работе проведен сравнительный анализ результатов расчета, полученных по линейному методу и предложенному инженерному нелинейному методу анализа прочности.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке РФФИ, номер проекта 19-29-13046.

Литература

[1] Дубовиков Е.А., Кондаков И.О., Марескин И.В., Фомин Д.Ю., Шаныгин А.Н., "Узел стыка отсеков фюзеляжа с сетчатой и традиционной конструктивно-силовыми схемами", Патент РФ на изобретение №2655585, 2018

[2] Andrey Chernov, Danil Fomin, Ivan Kondakov, Ivan Mareskin and Alexander Shanygin. Lightweight and reliable metal-composite joints based on harmonization of strength properties of joined parts. // Proc IMechE Part G: J Aerospace Engineering, 2018, Vol. 232(14) 2663–2672, DOI: 10.1177/0954410018778797

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРЕГУЛЯРНЫХ СЕТЧАТЫХ КСС ДЛЯ КОНСТРУКЦИИ ОТСЕКОВ ФЮЗЕЛЯЖА

Левченков М.Д., Дубовиков Е.А., Кондаков И.О.

ФАУ «ЦАГИ», Жуковский

mihalevch@mail.ru, evgeniy.dubovikov@gmail.com, ivan.kondakov@tsagi.ru

Появление полимерных композиционных материалов (ПКМ) в авиастроении открыло новые возможности по повышению весовой эффективности авиационных конструкций и поставило перед конструкторами задачу по поиску оптимальной конструктивно-силовой схемы (КСС) для данного типа материала. Как показала практика, применение композитных материалов в рамках традиционных (обшивочных) КСС сопряжено с появлением проблем, связанных с низкой ударпрочностью и наличием концентраторов напряжений на микроуровне из-за структурной неоднородности, что несвойственно для металлов, но характерно для композитов.

Для решения указанных выше проблем были предложены новые КСС на основе жестких реберных структур, позволяющих в большей степени использовать потенциал высокопрочных углеродных волокон и нивелировать недостаточные прочностные и деформационные характеристики современных связующих.

Одной из задач при создании подобных конструкций является проектирование рациональной сетчатой структуры. В данной работе рациональная реберная/сетчатая структура формировалась на основе генетического алгоритма. Целевой функцией оптимизации была масса конструкции сетчатого каркаса. В работе представлены результаты исследования по поиску оптимальной геометрии реберной сетки с нерегулярной структурой для конструкций отсеков фюзеляжа.

Публикация подготовлена в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020-2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 17.05.2022 г. № 075-15-2022-1023).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРЫЛА ПРОТОТИПА СВЕРХЗВУКОВОГО ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА

Попов В.П.², Гунчин В.К.¹, Устинов Б.Е.¹, Корольский В.В.¹

¹Московский авиационный институт, Москва

²Филиал ПАО «Корпорация «Иркут» «Региональные самолеты», Москва

V.Popov@ssj.irkut.com, GunchinVK@mai.ru, UstinovBE@mai.ru, KorolskijVV@mai.ru

Напряженно-деформированное состояние крыла самолета характеризуется достаточно сложным распределением напряжений, сил и моментов в его конструктивно силовых элементах. Расчет значений вышеупомянутых факторов с достаточной степенью точности аналитическим путем невозможен в силу ряда причин, среди которых можно отметить как определенное разнообразие конструктивно силовых схем крыла, так и его сложную форму в плане (применение различных наплывов, изменение стреловидности по передней и задней кромке, и другие конструктивные особенности), а также невозможность аналитического представления достоверного характера распределения давления по поверхности крыла, с учетом таких сложных пространственных явлений в газах как сжимаемость и турбулентность, взаимное влияние крыла и фюзеляжа и т.д. Неточности и допущения в определении величин и характера распределения внешних нагрузок приводят к неверному определению основных геометрических параметров (толщин, высот, площадей) элементов конструкции агрегатов планера самолета, следствием чего является его перетяжеление. При создании сверхзвукового пассажирского самолета второго поколения, массовое совершенство конструкции является одним из параметров первостепенной важности, влияющим на экономическую эффективность будущего самолета, а значит и на его коммерческий успех на рынке.

В работе для характерных расчетных случаев осуществляется численное моделирование внешних нагрузок на крыло прототипа сверхзвукового пассажирского самолета при помощи двусторонней связи гидро-газодинамического и конечно-элементного решателей. В результате чего определена полетная форма крыла самолета прототипа для выбранного режима полета, а также наиболее рациональным образом распределены толщины обшивки и основных элементов конструктивно-силовой схемы крыла.

Литература

- [1] Jan R. Wright, Jonathan E. Introduction to aircraft aeroelasticity and loads - Second Edition – 2015. – 539 с.
- [2] Кузнецов О.А. Динамические нагрузки на самолет – Москва, 2008. – 264 с.
- [3] Нормы летной годности самолетов транспортной категории, Часть 25 – Межгосударственный авиационный комитет, 2020. – 328 с.
- [4] Leland M. Nicolai., Grant E. Carichner., Joseph A. Schetz. Fundamentals of Aircraft and Airship Design, Volume I — Aircraft Design – American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Reston, Virginia, 2010. – 755 с.
- [5] Чепурных И.В. Прочность конструкций летательных аппаратов – Комсомольск-на-Амуре, 2013 – 137 с.
- [7] Бюшгенс Г.С. Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов – Москва, 1998 – 816 с.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЁТА АЭРОУПРУГОГО СОСТОЯНИЯ КРЫЛА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ДИПОЛЬНОЙ РЕШЁТКИ И ДВУХСВЯЗНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Гунчин В.К.¹, Устинов Б.Е.¹, Рыманова А.Н.¹, Титов Е.И.¹, Больших А.А.¹

¹*Московский авиационный институт, МАИ*

GunchinVK@mai.ru, UstinovBE@mai.ru, RymanovaAN@mai.ru, TitovEI@mai.ru,
BolshikhAA@mai.ru

Одной из основных задач при проектировании авиационной техники является определение нагрузок, действующих на самолёт. Это необходимо для верного подбора характеристик основных элементов конструктивно-силовой схемы агрегатов планера [4]. Выбор расчетных случаев как правило осуществляется в соответствии с существующим сертификационным базисом. При определении величин внешних нагрузок немаловажную роль играет выбранный расчетный метод. В связи с ростом производительности вычислительных систем стало возможным использование самых современных методов моделирования динамики жидкостей и газов [5], для получения наиболее точных значений внешних нагрузок.

В работе приводится сравнительная оценка известных методов расчета внешних нагрузок: численного моделирования с помощью двухсторонней связи решателя реализующего метод контрольных объемов и конечно-элементного решателя, а также с помощью передачи нагрузок, рассчитанных панельным методом (метод дипольной решетки) в конечно-элементный решатель.

В рамках работы выполнен расчет внешних нагрузок, действующих на известную модель, крыла (HIRENASD) [1-3], для выбранных расчетных случаев, с использованием двух разных методов получения величин внешних нагрузок. Результатом работы является сравнительный анализ полученных результатов, как с точки зрения распределения нагрузок по поверхности крыла для разных чисел маха и скоростных напоров, так и с точки зрения влияния внешних нагрузок на величины основных сил и моментов, действующих на конструкцию исследуемой модели.

Дальнейшим шагом в проработке данной тематики будет разработка методики учета кривизны поверхности аэродинамического профиля для уточнения результатов.

Литература

- [1] Ballmann, J., Boucke, A., Chen, B., Reimer, L., Reimer, L., Behr, M., Behr, M., Dafnis, A., Buxel, C., Buesing, S. et al. Aero-structural wind tunnel experiments with elastic wing models at high Reynolds numbers (HIRENASD-ASDMAD). – In Proceedings of the 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, FL, USA, 4–7 January 2011; p. 882.
- [2] Hassan, D., Ritter, M. Assessment of the ONERA/DLR Numerical Aeroelastics Prediction Capabilities on the HIRENASD Configuration. – In Proceedings of the International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, Paris, France, 26–30 June 2011.
- [3] Alan Mueller & Sergey Zhelzov. HIRENASD: Validations. – In 1st Aerolastic Prediction Workshop Honolulu, April 2012
- [4] Мензульский С.Ю., Бура Р.В. Расчет динамических аэроупругих характеристик сверхзвукового летательного аппарата. XLI Академические чтения по космонавтике. Секция 22 имени академика В.Н. Челомия. – Москва 24–27 января 2017 г., Сборник тезисов, 2017, с. 512.
- [5] Радциг А.Н. Экспериментальная гидроаэродинамика. – Москва, Изд. МАИ, 2004, 294 с.

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ И АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ РЕЗОНАНСНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА

Игумнова В.С.¹, Лукин А.В.¹, Попов И.А.¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург
igumnovavs@mail.ru, lukin_av@spbstu.ru, popov_ia@spbstu.ru

В последние годы наблюдается интенсивное развитие индустрии нано- и микроэлектромеханических систем, в частности датчиков ускорения [1]. Разработка новых перспективных конструкций МЭМС-акселерометров является актуальной задачей инженерного и научного сообщества [2,3,4]. Развитием квазистатических схем стали резонансные акселерометры с дифференциальной схемой измерения колебаний, где чувствительный элемент совершает колебания на одной из резонансных частот [5]. Главное преимущество таких механических реализаций заключается в возможности конструкционного подавления температурных помех. Полезным сигналом является разность с двух ёмкостных преобразователей с различными частотами, которая имеет вид биений. Ускорение объекта измеряется по огибающей режима биений в выходном сигнале датчика [6]. Дифференциальный способ измерения позволяет повысить точность измерения. Одним из применений подобной конструкции может стать гравиметр [7,8], предназначенный для высокоточного измерения силы тяжести, которая может изменяться в зависимости от ландшафта земной поверхности. Он может быть установлен на беспилотных летательных аппаратах и применяться для поиска полезных ископаемых более эффективными методами.

В данной работе предложена архитектура МЭМС-акселерометра с дифференциальной схемой измерения. Колебания возбуждаются гребенчатой структурой электродов, измерение колебаний считывается электродами с меняющимся зазором. Приложенное ускорение приводит в движение инерционную массу, которая в свою очередь воздействует на чувствительный элемент, изменяя частоту его колебаний, что и является полезным выходным сигналом. Рассмотрены вопросы практической реализации предложенной схемы, а также изучено влияния конструкционных несовершенств на точность и стабильность измерений. Проведено конечно-элементное моделирование системы и аналитическое исследование нелинейной динамики инерциального датчика навигации при различных внешних воздействиях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-10009, <https://rscf.ru/project/21-71-10009/>

Литература

- [1] Hajjaj A. Z. et al. Linear and nonlinear dynamics of micro and nano-resonators: Review of recent advances //International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2020. – Т. 119. – С. 103328.
- [2] Liu H., Zhang Y., Wu J. Structural Design and Testing of a Micromechanical Resonant Accelerometer //Micromachines. – 2022. – Т. 13. – №. 8. – С. 1271.
- [3] Shi F. T. et al. Modeling and analysis of a novel ultrasensitive differential resonant graphene micro-accelerometer with wide measurement range //Sensors. – 2018. – Т. 18. – №. 7. – С. 2266.
- [4] Pandit M. et al. An ultra-high resolution resonant MEMS accelerometer //2019 IEEE 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). – IEEE, 2019. – С. 664-667.
- [5] Wang C. et al. Micromachined accelerometers with sub- $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ noise floor: A review //Sensors. – 2020. – Т. 20. – №. 14. – С. 4054.
- [6] Shiroky I. B., Gendelman O. V. Modal synchronization of coupled bistable van der Pol oscillators //Chaos, Solitons & Fractals. – 2021. – Т. 143. – С. 110555.
- [7] Mustafazade A. et al. A vibrating beam MEMS accelerometer for gravity and seismic measurements //Scientific reports. – 2020. – Т. 10. – №. 1. – С. 1-8.
- [8] Fang Z. et al. A sensitive micromachined resonant accelerometer for moving-base gravimetry //Sensors and Actuators A: Physical. – 2021. – Т. 325. – С. 112694.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭФФЕКТОВ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Мансырев Д.Э., Полянский В.А., Яковлев Ю.А.

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

pva@ipme.ru

Техническая диагностика текущего состояния металлических конструкций является важной частью жизненного цикла современных машин, трубопроводов, мостов. В настоящий момент, она, в основном, сводится к визуальному или лазерному контролю внешней формы и различным видам дефектоскопии. Опыт эксплуатации показывает, что этого не достаточно. Уровень аварийности, связанной с непрогнозируемым разрушением металлических конструкций, на железнодорожном транспорте снизить не удастся, а в некоторых отраслях он даже возрастает. В этих условиях большое значение играют новые методы технической диагностики ориентированные не на поиск отдельных дефектов или микродефектов структуры металла, а на интегральную оценку накопления поврежденности частей металлоконструкции под нагрузкой.

Поверхностный эффект накопления поврежденности в металлах проявляется в важнейших для технической диагностики случаях: при пластической деформации, при многократных циклических нагрузках, при контакте с коррозионными и агрессивными внешними средами, при развитии хрупкости жидкого металла, при контакте с водородом и водородосодержащими средами. Несмотря на различную природу индуцирующих поверхностный эффект факторов, во всех случаях происходит модификация микро структуры и накопление поврежденности в тонком поверхностном (пограничном) слое металла глубиной порядка 100 мкм.

С одной стороны, с точки зрения механики, такой слой является сингулярностью, которую трудно определить при диагностике массивных деталей и описать с помощью моделей сплошной среды, с другой стороны, наблюдаемое сильное влияние этого слоя на несущую способность металлоконструкций, приводящее к разрушению, должно иметь значимые индикаторы. Наши исследования позволили выделить два индикатора, которые можно использовать на практике для диагностики состояния металлоконструкций. При накоплении поврежденности в поверхностном слое происходит резкое изменение интегральной акустической анизотропии и примерно на два порядка увеличивается локальная концентрация водорода в этом слое.

В докладе приводятся конкретные примеры технической диагностики, позволяющей зафиксировать накопление поврежденности, как с помощью ультразвука, так и с помощью анализатора водорода.

Обсуждаются математические модели, описывающие образование сингулярного пограничного слоя и его влияние на напряженно-деформированное состояние массивных металлических деталей. Описаны механизмы, позволяющие детектировать сингулярности методами ультразвукового зондирования, которые дают фундаментальные обоснования методов диагностики, основанных на поверхностном эффекте накопления поврежденности.

Описаны примеры одновременного использования скорости звука и концентрации водорода, как индикаторов накопления поврежденности, что позволяет детектировать коррозионные повреждения и водородную хрупкость на раннем этапе их формирования

ДИСПЕРСИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ И ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ ИЗГИБНЫМИ ВОЛНАМИ В БАЛКЕ, ЛЕЖАЩЕЙ НА ОБОБЩЕННОМ УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

Ерофеев В.И.^{1, 2}, Ленин А.О.¹, Лисенкова Е.Е.¹, Царев И.С.²

¹Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФИЦ «Институт прикладной физики Российской академии наук», Нижний Новгород

²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

erof.vi@yandex.ru, lehan_lenin@mail.ru, eelissen@yandex.ru, tsarev_ivan97@mail.ru

Рассматривается динамика балки Бернулли-Эйлера, лежащей на упругом основании. Выбирается обобщенная модель упругого основания, включающая в себя два независимых коэффициента постели: жесткости основания на деформации растяжения-сжатия и на деформации сдвига. В отличие от классической модели упругого основания (модель Винклера), обобщенная модель учитывает распределительную способность грунта, т.е. его свойство оседать не только под нагруженной областью, под фундаментом, но и вблизи него. Балка считается бесконечной. Такая идеализация допустима, если на ее границах находятся оптимальные демпфирующие устройства, то есть параметры граничного закрепления таковы, что падающие на него возмущения не будут отражаться [1]. Это позволяет рассматривать модель балки без учета граничных условий, а вибрации, распространяющиеся по балке, считать бегущими изгибными волнами. Изучается влияние двухконстантного упругого основания на параметры изгибной волны, распространяющейся в балке. Изучается влияние двухконстантного упругого основания на параметры изгибной волны, распространяющейся в балке. Показано, что при возрастании сдвиговой жесткости упругого основания волны, имеющие одинаковое волновое число (т.е. волны одинаковой длины) будут иметь большую частоту, большую фазовую и групповую скорости. Для рассматриваемой системы в дивергентной форме записано уравнение переноса энергии. Показано, что средняя скорость переноса энергии равняется групповой скорости изгибной волны. Равенство этих скоростей служит дополнительным фактором, свидетельствующим о внутренней физической непротиворечивости модели изгибных колебаний балки, лежащей на обобщенном упругом основании.

Литература

[1] Весницкий А.И. Избранные труды по механике – Нижний Новгород, 2010. – 248 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАРОЖДЕНИЯ И РОСТА УСТАЛОСТНЫХ КВАЗИТРЕЩИН ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Никитин И.С., Никитин А.Д.

Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

i_nikitin@list.ru, nikitin_alex@bk.ru

Переход от механических испытаний образцов к прогнозированию ресурса и долговечности полноразмерных элементов конструкций потребовал развития теории и моделей разрушения, позволяющих переносить результаты экспериментальных исследований в инженерную практику. В настоящей работе рассматривается проблема разрушения авиационных материалов и элементов конструкций под действием циклических нагрузок. Развитие моделей циклического разрушения непрерывно связано с расширением представлений об усталости материалов. Согласно современным представлениям, выделяют несколько основных режимов усталостного разрушения: малоцикловая усталость (МЦУ), многоцикловая усталость (МНЦУ) и сверхмногоцикловая усталость (СВМУ). В настоящее время указанные режимы объединяют в единую кривую усталости, имеющую несколько ветвей или ступеней. Для описания полной кривой усталости необходимо ввести мультимодальное распределение усталостной долговечности, для чего удобно воспользоваться соотношением Баскина, устанавливающим связь между амплитудой напряжений и количеством циклов до разрушения на каждой из ветвей. Подобное обобщение кривых усталости выполнено в работе [1] и развито в однокритериальную мультирежимную модель усталостного разрушения по механизму роста трещин нормального отрыва [2], а затем распространено на случай трещин двух типов: нормального отрыва и сдвига [3]. На основе предложенной мультирежимной двухкритериальной модели [3] усталостного разрушения предложен метод сквозного счета зарождения и развития узких локализованных зон поврежденности в элементах конструкций для различных режимов циклического нагружения. Такие узкие зоны поврежденности можно рассматривать как квазитрещины двух типов, соответствующих механизмам нормального отрыва и сдвига.

Рассмотрен важный для приложений пример полетного цикла нагружения (многоцикловая усталость) и высокочастотного циклического нагружения при крутильно-изгибных колебаниях лопаток (сверхмногоцикловая усталость) диска компрессора авиационного газотурбинного двигателя. Дана оценка долговечности рассмотренного элемента конструкции при комбинированном нагружении в указанных циклических процессах.

Литература

- [1] Burago N.G., Nikitin I.S. Multiaxial Fatigue Criteria and Durability of Titanium Compressor Disks in low- and giga- Cycle Fatigue Modes. Heidelberg. Springer. Mathematical Modeling and Optimization of Complex Structures. 2016. – pp. 117–130.
- [2] Nikitin I.S., Burago N.G., Zhuravlev A.B. and Nikitin A.D. Multi-mode model for fatigue damage development. Mechanics of Solids. 2020. – Vol. 55, № 8. – pp. 298–306.
- [3] Никитин И.С., Бурого Н.Г., Никитин А.Д. Повреждаемость и усталостное разрушение элементов конструкций в различных режимах циклического нагружения. Прикладная математика и механика, 2022. – Т.86, №2. – С. 276–290.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ОБЪЕМНО-АРМИРОВАННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ СЖАТИИ

Словиков С.В.¹, Бабушкин А.В.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
sslovikov@ya.ru

Активное использование композитных материалов (КМ) при производстве промышленных изделий и, в частности, авиационных, обуславливает необходимость проведения широкого спектра различных исследований механического поведения. В дальнейшем полученные данные используются при расчетах в системах математического моделирования именно в условиях применения материалов [1, 2, 3]. Актуальными задачами являются решения проблем, связанных с созданием новых КМ и внедрение импортозамещения в производство композитов [4, 5].

В процессе эксплуатации КМ возникают такие дефекты как расщепление, растрескивание, расслоение матрицы, разрывы волокон - то есть накапливаются повреждения. Распространенным методом количественного описания процесса накопления повреждения является использование параметра поврежденности ω [6, 7].

В ходе данного исследования механическим испытаниям на квазистатическое сжатие были подвергнуты КМ, выполненные из переплетённых нитей углеродного волокна, расположенных в матрице из эпоксидного связующего. Для изготовления образцов использованы материалы: углеродная нить Umatex UMT49 (ООО «Дипчел», Россия) и связующее ВСЭ-59 (ФГУП «ВИАМ»); углеродная нить Torayca - T800H и связующее Toray TC350 (оба производства Toray Composite Materials America, Inc.) Образцы изготовлены из 3D-тканых преформ углеродного волокна по технологии пропитки под давлением. Механические испытания на сжатие проведено на образцах с использованием системы 3D анализа полей перемещений и деформаций на поверхности. Получены диаграммы в параметрах поврежденности Работнова - Качанова. Предложена линейная аппроксимация процессов поврежденности. Выполнен сравнительный анализ процессов накопления механических повреждений при квазистатическом сжатии. Определён параметр критической поврежденности материала при сжатии.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-10205).

Литература

- [1] Янкин А.С., Бульбович Р.В., Словиков С.В. Математическая модель и экспериментальные исследования поведения вязкоупругих наполненных полимеров при двухчастотных воздействиях// Вестник ПНИПУ. Механика, 2017, N 2, С. 208-225
- [2] Slovikov S.V., Lobanov D.S. Mechanical properties of a basalt-fiber-reinforced plastic rod used in composite high-voltage wires in torsion and three-point bending// Mechanics of Composite Materials. 2020, V. 56, N 3, С. 353-360
- [3] Strungar E., Lobanov D., Wildemann V. Evaluation of the Sensitivity of Various Reinforcement Patterns for Structural Carbon Fibers to Open Holes during Tensile Tests // Polymers. – 2021. – Vol. 13. – № 24. – Р. 4287.
- [4] Гуляева А.Г. и др. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ - 1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax// Авиационные материалы и технологии. 2018, №3 (52), С. 18-26
- [5] Евдокимов А. А. и др.. Производство объемно-армированных тканых преформ для изготовления изделий авиационной техники в России и за рубежом// Химические волокна. 2019, № 2, С. 30-33.
- [6] Качанов Л. М. О времени разрушения в условиях ползучести // Изв.АН СССР. Отд.техн.наук. 1958. С. 26–31
- [7] Работнов Ю. Н. Избранные труды. Проблемы механики деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1991.

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОГРАНИЧЕНИЙ ПО ДОПУСТИМЫМ ДЕФОРМАЦИЯМ

Турбин Н.В., Шелков К.А.

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),
Москва

TurbinNV@mai.ru, ShelkovKA@mai.ru

Создание перспективного сверхзвукового пассажирского самолета (ПСПС) связано с преодолением большого числа технических трудностей путем применения последних достижений в науке и технике. Так, использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) является одним из факторов, определяющих весовое совершенство современных авиационных конструкций, поэтому предполагается конструктивно силовую схему (КСС) ПСПС изготавливать с большой долей употребления ПКМ. При этом рядом научных коллективов предлагается использовать в качестве конструктивного решения для несущих панелей крыла и фюзеляжа панели с сетчатым подкреплением, так как в них наиболее полно реализуются преимущества ПКМ перед традиционными материалами, по сравнению с широко применяемыми стрингерными панелями из ПКМ [1].

Требования безопасности и экономической эффективности требуют обеспечения необходимого ресурса для воздушного судна. Современные модели накопления усталостного повреждения в ПКМ на основе деградации жесткости [2] не только позволяют произвести расчет ресурса конструкции, но также выделить моды усталостного разрушения.

В настоящем исследовании, с помощью метода расчета долговечности конструкции, основанного на деградации жесткости монослоя ПКМ, определяется усталостная прочность стрингерной панели и панели с сетчатым подкреплением с использованием ограничений по допустимым деформациям. Особенностью расчетов является то, что вовремя расчета деградации жесткости монослоев ПКМ происходит пересчет опорного анализа, который определяет НДС конструкции, благодаря чему была получена эволюция жесткостей панелей при действии циклической нагрузки.

Циклические напряжения соответствуют эквивалентным напряжениям типового полета, взятым из литературы [3]. В расчетах принимается, что материалом стрингеров и обшивки традиционной конструкции, ребер сетчатой конструкции является отечественный углепластик АСМ 102/С130UD на основе волокна UMT 49S [4].

Литература

- [1] Васильев В.В., Разин А.Ф. Перспектива применения сетчатых композитных конструкций в гражданской авиации // Полет. – 2016. – №11-12. – С.3-12.
- [2] M. Hack et al., “A progressive damage fatigue model for unidirectional laminated composites based on finite element analysis : theory and practice,” FRATTURA ED INTEGRITA STRUTTURALE, no. 46, pp. 54–61, 2018
- [3] Bakuckas Jr. J.G., Chadha R., Swindell P., Fleming M., Lin J.Z., Ihn J.B., Desai N., Espinar-Mick E. and Freisthler M. Bonded Repairs of Composite Panels Representative of Wing Structure. Proceedings of the 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, June 2-7, 2019, Krakow, Poland, pp. 565-580
- [4] Свойства волокна UMATEX URL: <https://umatex.com/production/fiber/> дата обращения 27/06/2022

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЛОКАЛИЗОВАННЫМ СДВИГОМ КАК РЕЗУЛЬТАТА СКАЧКООБРАЗНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЕ

Сокоиков М.А.¹, Симонов М.Ю.^{1,2}, Чудинов В.В.¹, Оборин В.А.¹, Уваров С.В.¹,
Наймарк О.Б.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
sokovikov@icmm.ru

Эксперименты по динамическому нагружению образцов проводились на стержне Гопкинсона - Кольского и при пробивании преград. Температурные поля в процессе деформирования исследовались «in-situ» с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M.

Микроструктурный анализ, проведенный с помощью оптического интерферометра-профилометра и сканирующего электронного микроскопа показал коррелированное поведение ансамбля дефектов, которое может быть классифицировано, как структурный переход, обеспечивающий локализацию деформации.

Данные экспериментальных исследований и численного моделирования, проведенного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале позволяют предполагать, что один из механизмов локализации пластической деформации для исследованных материалов при реализованных условиях нагружения обусловлен скачкообразными процессами в дефектной структуре материалов [1-7].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-79-30041).

Литература

- [1] Сокоиков М.А., Билалов Д.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Плехов О.А., Терехина А.И., Наймарк О.Б. Неравновесные переходы в ансамблях дефектов при динамической локализации пластической деформации // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т.40, В. 23. – С.82 - 88.
- [2] Билалов Д.А., Сокоиков М.А., Чудинов В.В. Многомасштабные механизмы локализации пластической деформации при пробивании преград // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – № 5. – С. 43-47.
- [3] Сокоиков М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Изучение механизма разрушения сплавов локализованным сдвигом при динамическом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2019. – Т. 12, № 3. – С.301-312.
- [4] Билалов Д.А., Сокоиков М.А., Баяндин Ю.В., Чудинов В.В., Оборин В.А., Наймарк О.Б. Описание эффекта падения прочности сплава АМг6 с ростом температуры при динамическом нагружении // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2019. – № 5. – С.5-14.
- [5] Сокоиков М.А., Симонов М.Ю., Билалов Д.А., Ю.Н. Симонов Ю.Н., Наймарк О.Б. Локализация пластической деформации в сплаве АМг6 при динамическом нагружении // Физическая мезомеханика. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 45–57.
- [6] Сокоиков М.А., Симонов М.Ю., Оборин В.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Изучение разрушения локализованным сдвигом сплава амг6 при статическом и динамическом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14, № 3. – С. 300-311.
- [7] Сокоиков М.А., Оборин В.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Экспериментальное исследование локализации пластической деформации в сплаве АМг6 при различных видах динамического воздействия // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2021. – №3. – С.154-162.

ОПТИМИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ УПРУГИХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ КРАЕВЫХ НАГРУЗОК

Лалин В.В. , Лебедева А.А. , Шакирова Р.М.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

vllalin@yandex.ru, anyaleb99@gmail.com, renshaxxx99@gmail.com

В настоящей работе рассматривается задача оптимального управления напряженно-деформированным состоянием упругих систем с помощью дополнительных краевых нагрузок. Частным случаем таких задач являются задачи минимизации уровня напряженно-деформированного состояния систем. Для этого при стандартном подходе в качестве целевой функции используется среднеквадратичная норма напряжений (или перемещений), которую нужно минимизировать за счет выбора управляющих воздействий – дополнительных краевых нагрузок. Такая целевая функция не связана напрямую с математической постановкой задачи, что приводит к достаточно сложным алгоритмам решения задачи оптимизации – необходимости использования методов математического программирования, которые не реализованы в существующих программных комплексах по расчету конструкций.

В настоящей работе предлагается использовать в качестве целевой функции энергетическую норму – энергию деформаций системы. Такая целевая функция связана с вариационной постановкой задачи расчета упругой системы. В результате сформулирован простой алгоритм решения задачи оптимизации, который не требует использования методов математического программирования и может быть реализован на любом программном комплексе по расчету конструкций. Доказано, что этот алгоритм позволяет определить оптимальную нагрузку, которая дает решение, минимальное в энергетической норме. Приводятся примеры решения задач.

НИЗКОЧАСТОТНЫЙ МОНИТОРИНГ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И НАЛИЧИЯ ДЕФЕКТОВ В МАТЕРИАЛАХ И КОНСТРУКЦИЯХ

Анджикович И. Е.¹, Калинчук В.В.², Коновалов С.М.², Турчин А.С.^{1,2}

¹*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

²*Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону*

vkalin415@mail.ru

Развитие технологии современного производства приводят к необходимости создания простых, но достаточно эффективных методов неразрушающего контроля и непрерывного мониторинга состояния объекта, не наносящих при этом ему ущерба. Широкое распространение получили системы, основанные на низкочастотных или ультразвуковых воздействиях [1]. По реакции конструкции на эти воздействия судят о ее состоянии, наличии дефектов в форме трещин, пустот или инородных заполнений. Успешное применение таких подходов напрямую связано с используемыми математическими методами обработки регистрируемых ответных механических колебаний – реакции объекта на воздействие. Широкое распространение имеют ряд методов: традиционный спектральный подход, корреляционная обработка сигналов, подход, основанный на использовании искусственных нейронных сетей, вейвлет-преобразование сигналов и т.д. Альтернативой указанным методам обработки сигнала является метод оптимального ортогонального разложения сигналов по адаптивно-настраиваемому искусственному базису [2, 3]. Преимущество такого подхода является преобразование графиков регистрируемого сигнала в двумерные образы. Прямое преобразование без предварительной обработки сигнала применяется в случае, когда графики имеют явно детерминированный характер с малой шумовой составляющей.. В случае, когда имеют место помехи, для повышения эффективности применяется биспектральный подход. С этой целью осуществляется предварительная обработка волнового процесса в форме вычисления амплитудного спектра с использованием алгоритма дискретного преобразования Фурье. Использование этой процедуры в каждом конкретном случае позволяет провести своего рода адаптивную фильтрацию и уменьшить влияние малоинформативных шумовых составляющих на распределение двумерных образов в пространстве распознавания. Представлены результаты комплекса экспериментальных исследований эффективности предложенного подхода по распознаванию напряженного состояния и наличия дефектов в различных образцах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Южного федерального университета, грант № VnGr-07/2020-04-IM (Минобрнауки РФ). Отдельные фрагменты работы выполнены при финансовой поддержке РФФИ и администрации Краснодарского края (проект 19-48-230042).

Литература

- [1] Prawin J., Rao A R.M. Vibration-based breathing crack identification using non-linear intermodulation components under noisy environment. Structural Health Monitoring, 2019. v. 22(3), p.p. 1-19.
- [2] Бочарова О.В., Анджикович И.Е., Седов А.В., Калинчук В.В. О возможностях биспектрального подхода к обработке сигнала. Измерительная техника, 2017. №7. С. 23-32.
- [3] Бочарова О.В., Анджикович И. Е., Лыжов В.А., Седов А.В., Калинчук В.В. Об одном методе идентификации расслоений в композиционных материалах. Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2020. Т. 17. № 1. Ч. 1. С. 49-56.

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ, ИЗМЕРЯЕМЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ НА ОСНОВЕ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК

Матвеев В.П.¹, Кошелева Н.А.¹, Сероваев Г.С.¹, Федоров А.Ю.¹

¹*Институт Механики Сплошных Сред УрО РАН, Пермь*

kosheleva.n@icmm.ru

В докладе рассматриваются результаты численного моделирования погрешностей, которые могут иметь место при измерении деформаций волоконно-оптическими датчиками (ВОД), фиксируемыми на поверхности или встроенными в объем материала.

Для волоконно-оптических датчиков деформаций, фиксируемых на поверхности материала, можно ввести следующие оценки, определяющие достоверность значений деформаций. Первая из них связана с возможным различием деформаций в сердцевине волокна и на измеряемой поверхности материала, которое является результатом неоднородности деформации по толщине кварцевой оболочки световода, защитной оболочки оптического волокна и слое соединяющего материала между волокном и материалом. Вторая оценка учитывает возможные изменения деформаций в зоне их измерения, вызванные фиксацией оптического волокна на поверхности материала, и дает ответ на вопрос какие деформации измеряются. Для этой оценки необходимо сравнить деформации в зоне измерения без волокна и при его наличии на поверхности материала.

Погрешность при измерении деформаций, присущая волоконно-оптическим датчикам на брэгговских решетках, фиксированным на поверхности или в объеме материала, следует из соотношений для вычисления деформаций на основе измеряемых датчиком физических величин. В настоящей работе рассматривается вариант, связанный с использованием допущения об одноосном напряженном состоянии в зоне брэгговской решетки фиксируемой на поверхности или встроенной в объем материала. Использование данного допущения приводит к погрешности при вычислении деформаций на основе измеряемых физических величин.

Для численного анализа рассматриваемых погрешностей предлагаются модели, которые позволяют учитывать различные варианты сложно-напряженного состояния в зоне измерения деформаций. Рассмотрены варианты представления среды, в которой измеряются деформации, однородным изотропным, анизотропным и слоистым анизотропным деформируемыми телами, что позволяет моделировать широкий класс материалов, в частности полимерные композиционные материалы. Получены численные результаты, дающие, в рамках представленных моделей, оценки погрешностей с учетом различных вариантов напряженно-деформированного состояния в зоне измерения деформаций, механических свойств оптического волокна и материала, в котором измеряются деформации.

Публикация подготовлена 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).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПОМОЩИ ТОЧЕЧНЫХ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Матвеев В.П.¹, Кошелева Н.А.¹, Сероваев Г.С.¹

¹*Институт Механики Сплошных Сред УрО РАН, Пермь*

serovae@icmm.ru

Достоверное измерение деформаций в различных участках контролируемой конструкции является важной задачей при создании систем мониторинга механического состояния. Для решения данной задачи большой потенциал имеют волоконно-оптические датчики (ВОД), среди которых для измерения деформаций и температуры наибольшее распространение имеют точечные датчики на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР) и распределенные волоконно-оптические датчики на основе Рамановского, Бриллюэновского и Рэлеевского рассеяния. При распределенном измерении деформаций и температуры все тестируемое оптическое волокно является чувствительным элементом, в отличие от точечных волоконно-оптических датчиков, для которых чувствительностью к изменениям деформаций и температуры обладают только предварительно обработанные области оптического волокна. Среди распределенных волоконно-оптических датчиков наилучшим пространственным разрешением обладает метод, основанный на измерении спектрального сдвига в обратном Рэлеевском рассеянии, который позволяет проводить распределенные измерения деформаций и температуры при помощи стандартного одномодового оптического волокна.

В работе приведены результаты исследований по измерению деформаций в однородном и градиентном полях деформаций, с помощью распределенных волоконно-оптических датчиков на основе Рэлеевского рассеяния и сопоставление результатов измерений с точечными датчиками на основе волоконной брэгговской решетки. Продемонстрировано влияние длины фрагмента профиля рассеяния, используемого для вычисления деформаций на качество измерения неоднородного распределения деформаций. Приведены результаты экспериментов при размещении волоконно-оптических датчиков на поверхности материала с помощью клеевого соединения и при встраивании оптического волокна в объем материала на этапе его изготовления. В качестве исследуемых материалов рассмотрены полимерные композитные материалы, термопластичные материалы, используемые при производстве изделий с помощью аддитивных технологий методом послойного наплавления и используемый в строительстве цемент.

Полученные результаты демонстрируют удовлетворительное совпадение значений деформаций, полученных при использовании точечных и распределенных ВОД.

Публикация подготовлена 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).

ОЦЕНКА НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАНИЙ РЕШЕТКИ БРЕГГА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДЕФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Шардаков И.Н.¹, Шестаков А.П.¹, Глот И.О.¹, Епин В.В.¹, Гусев Г.Н.¹, Цветков Р.В.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

shardakov@icmm.ru, shap@icmm.ru, glot@icmm.ru, epin.v@icmm.ru, gusev.g@icmm.ru, flower@icmm.ru

На основе решеток Брегга создаются оптические датчики перемещения, деформации, давления, ускорения и температуры. Такие датчики имеют ряд преимуществ перед традиционными методами измерений: оптический датчик не чувствителен к электромагнитным наводкам; позволяет организовать протяженные измерительные линии; позволяет коммутировать множество датчиков на одной измерительной линии; обладает очень маленькими размерами и весом; оптическая линия обладает низкой теплопроводностью, а датчик низкой теплоемкостью; линия и датчик обладают полной взрывобезопасностью. Благодаря таким преимуществам оптические датчики получили широкое распространение в мониторинге зданий, мостов, трубопроводов, шахт и тоннелей в силу их большой протяженности. Также оптоволоконные датчики широко применяются при мониторинге композиционных материалов, поскольку позволяют реализовать встраивание в материал без потери его прочностных характеристик за счет небольших размеров датчика и линии.

Показания брегговской решетки определяются на основе отраженного от нее оптического излучения. Количественной характеристикой этого излучения является длина волны на которой достигается максимальная мощность оптического сигнала. Эта характеристика называется центральной длиной волны решетки. Смещение центральной длины волны зависит от температуры и деформации. Построение датчика на основе решетки Брегга требует точного определения этой зависимости. Ее называют калибровочной. Как правило, используется линейное приближение калибровочной зависимости. Однако из литературы известно, что смещение длины волны решетки имеет сильную нелинейную зависимость от температуры при $5 < T < 200\text{K}$ и слабую квадратичную зависимость при температурах близких к комнатным. Авторы на данный момент не обнаружили сведений о учете всех членов квадратичного разложения калибровочной зависимости при температурах близких к комнатным. Устранению этого пробела посвящена эта работа. В работе выполнено нагружение оптического волокна с решеткой тремя различными грузами. Для каждого груза выполнено ступенчатое изменение температуры от 5 до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ с шагом $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. На основе этих данных определены все члены квадратичного разложения искомой функции. Показан вклад каждого из слагаемых. На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы: в том случае, когда необходимая точность измерительной системы не превышает 5% можно ограничиться линейным приближением; для обеспечения точности измерительной системы 1% и лучше необходимо учитывать все члены квадратичного разложения. Точность определения центральной длины волны с помощью современных интеррогаторов составляет 1 pm . Это соответствует деформации $\approx 0.8\text{ мкэ}$. Обычные датчики деформации имеют рабочий диапазон $\pm 2000\text{ мкэ}$, как следствие, достижимая точность измерения деформации с помощью решеток Брегга составляет 0.04%. Поэтому для полной реализации возможностей современных интеррогаторов следует применять квадратичную аппроксимацию с учетом всех членов разложения.

МОНИТОРИНГ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ТРУБЫ ИЗ ПКМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЛОКОННО- ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Никифоров А.С.¹, Баранов М.А.¹, Шипунов Г.С.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

aleksandr.niciforov@gmail.com, maximbaranov.123@gmail.com, gsshipunov@gmail.com

В настоящее время безопасности трубных конструкций и резервуаров нефтегазовой отрасли уделено особое внимание, поскольку разрушение и преждевременный выход из строя таких конструкций приводит к утечке нефтепродуктов и, как следствие, загрязнению окружающей среды [1]. При решении проблем преждевременного выхода из строя конструкций нефтегазовой отрасли различные ученые начали применять системы мониторинга структурного состояния на основе волоконно-оптических датчиков (ВОД), которые хорошо себя зарекомендовали при мониторинге напряженно-деформированного состояния гражданских и авиационных конструкций [2,3].

Однако вопрос эффективности применения систем мониторинга на основе ВОД для контроля внутреннего давления и напряженно-деформированного состояния конструкций нефтегазовой отрасли остается открытым [4,5]. Таким образом, целью данной работы является оценка применимости систем мониторинга на основе ВОД для контроля внутреннего давления и возможности локализации области разрушения трубы из стеклопластика при нагружении внутренним давлением.

В рамках проведенного исследования на стеклопластиковую трубу приклеивались три линии с ВОД, после чего осуществлялось нагружение трубы внутренним давлением от 2.5 до 170 Бар. По результатам механических испытаний, получена линейная зависимость внутреннего давления от деформаций, регистрируемых ВОД. Полученная зависимость позволяет в режиме реального времени оценивать внутреннее давление в трубных конструкциях в процессе их эксплуатации. Кроме того установлено, что ВОД способны регистрировать начало разрушения конструкции и позволяют локализовать область разрушения. Таким образом, в рамках исследования продемонстрирована эффективность применения ВОД для контроля внутреннего давления трубных конструкций и резервуаров нефтегазовой отрасли, а также локализации области их разрушения в процессе эксплуатации.

Литература

- [1] Sasaki T. Fibre optic monitoring and finite element analysis of well integrity in methane hydrate reservoirs, 2019. – 244 p.
- [2] Kachura S.M., Postnov V.I. Perspective optical fiber sensors and their application (review) // Proc VIAM, 2019. – Vol. 5, – № 5. – P. 52–61.
- [3] Matveenko V.P. et al. On application of distributed FOS embedded into material for the mechanical state monitoring of civil structures // Procedia Struct Integr. Elsevier B.V., 2021. – Vol. 33, – № C. – P. 925–932.
- [4] Zhao Y., Wu Q. lu, Zhang Y. nan. Theoretical analysis of high-sensitive seawater temperature and salinity measurement based on C-type micro-structured fiber // Sensors Actuators B Chem. Elsevier, 2018. – Vol. 258. – P. 822–828.
- [5] Biondi Vaccariello A.M. et al. Optical fiber sensing textile for temperature and strain distributed measurement // SPIE, 2021. – Vol. 11592. – P. 322–328.

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, АРМИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИОННОЙ АРМАТУРОЙ

Гусев Г.Н.¹

¹Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения РАН, Пермь
gusev.g@icmm.ru

Применение современных композиционных материалов в строительстве на сегодняшний день приобретает все больший объем и распространение по различным отраслям, начиная с использования в частном домостроении и заканчивая производством крупно-объемного гражданского и промышленного строительства. Наряду с тем, что линейка различных материалов и конструктивных элементов на основе композиционных материалов ширится, нормативная база по их применению остается слабо развитой [1, 2]. Связано это в первую очередь с недостаточным экспериментальным сопровождением новых разрабатываемых конструктивных решений, как на этапе проектирования, так и на этапе внедрения в производство строительных конструкций. Тем не менее, в определенном объеме работы предпринимаются и на основе их результатов разрабатываются новые нормативные документы, которые позволят в будущем использовать современные композиционные материалы в объеме сопоставимым с «классическими» материалами, такими как железобетон, конструкционная сталь и др. [3,4]. В данной работе приведены результаты исследования возможности применения стеклопластиковой композиционной арматуры в качестве армирующего элемента кладки наружной версты из пустотелого керамического и силикатного кирпича. Исследование является комплексным и в его рамках проведены как численные эксперименты с применением метода конечных элементов [5], так и натурные экспериментальные исследования на отдельных образцах из используемых материалов и целых крупногабаритных фрагментах кирпичных стен на специально спроектированной экспериментальной установке. В рамках проведенного исследования изучены процессы деформирования кладки наружной версты армированной как стальной арматурой, так и стеклопластиковой в условиях нормальной работы и с учетом образования трещин в области критического нагружения. Проведена серия экспериментов по температурному воздействию на образцы в климатической камере. На основе проведенного исследования разработаны технические условия использования стеклопластиковой арматуры в качестве армирующего элемента в кладке наружной версты при строительстве многоэтажных жилых домов.

Литература

- [1] СП 295.1325800.2017 Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования.
- [2] СП 15.13330.2012 Каменные и армокаменные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-22-81*.
- [3] Гиль А.И., Бадалова Е.Н., Лазовский Е.Д. Стеклопластиковая и углепластиковая арматура в строительстве: преимущества, недостатки, перспективы применения//Вестник полоцкого государственного университета. Серия строительство. Прикладные науки – 2015 г.
- [4] Николукин А.Н и др. Экспериментальные исследования прочности сцепления стеклопластиковой арматуры с цементно-песчаным бетоном// Транспортные сооружения. ООО "Издательство "Мир науки", 2019 г.
- [5] Гусев Г.Н. Моделирование поведения кирпичной кладки армированной композитной арматурой. Численный и натурный эксперименты//Научно-технический вестник Поволжья, 2018 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРО-БИОНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА (СПС) С НИЗКИМ УРОВНЕМ ЗВУКОВОГО УДАРА

Чернышев С.Л.¹, Матвеев В.П.², Зиченков М.Ч.¹, Шаныгин А.Н.¹, Дубовиков Е.А.¹

¹ФАУ «ЦАГИ», Жуковский

²ПФИЦ УрО РАН, Пермь

alexander.shanygin@tsagi.ru

В настоящей работе представлены результаты исследований по развитию концепции гибридной конструкции планера СПС, где ряд ответственных высоконагруженных отсеков формируется на основе про-бионических КСС [1]. Показано, что такая конструкция СПС имеет потенциал в снижении веса планера по сравнению с конструкцией на основе традиционных КСС. В рамках предложенной гибридной конструкции планера используются три типа отсеков: металлические, композитные типа «Black metal» и отсеки с про-бионической КСС. Про-бионические отсеки планера формировались на основе: 1) однонаправленных композитных сетчатых каркасов [2], 2) металло-композитных стыковочных узлов [3], 3) 3D армированных обшивок, включающих ударопрочные слои, 4) элементов системы встроенного мониторинга технического состояния конструкции на основе оптоволоконных и других типов датчиков.

На основе комплексного анализа прочности представлены результаты по исследованию эффективности использования подобной конструкции с точки зрения снижения веса планера и обеспечения необходимого уровня надежности в эксплуатации. Проанализированы возможности получения положительной синергии от взаимодействия основных элементов про-бионической конструкции, с точки зрения создания эффективной системы защиты высоконагруженного силового каркаса от ударных воздействий при использовании мониторинга технического состояния конструкции планера СПС. Представлена концепция мониторинга технического состояния на основе оптоволоконных технологий и smart-систем.

В работе представлены результаты многодисциплинарного поиска рациональных значений конструктивных параметров исследуемой конструкции СПС, включая оценку запасов прочности всех элементов конструкции при критических случаях нагружения. На основе анализа результатов расчетных и экспериментальных исследований обоснован потенциал снижения массовых характеристик предложенной конструкции планера.

Финансирование: 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] E. Dubovikov, M. Zichenkov, I. Mareskin, A. Chernov, A. Shanygin, Investigation of influence of synergetic effect on strength and weight of primary frame aircraft structures. Proceedings of the 31st International Congress of the Aeronautical Sciences. Belo Horizonte. September. 2018.
- [2] Васильев В. В. и др. Анизотридные композитные сетчатые конструкции-разработка и приложение к космической технике // Композиты и наноструктуры. – 2009. – №. 3. – С. 38.
- [3] Kondakov, I., Chernov, A., Fomin, D., Mareskin, I., Shanygin, A Lightweight and reliable metal–composite joints based on harmonization of strength properties of joined parts //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. – 2018. – Т. 232. – №. 14. – С. 2663-2672.

ПАВ ДАТЧИК ДЕФОРМАЦИИ НА ТОНКОЙ ПЛЕНКЕ BST

П.Е. Тимошенко², В.Б. Широков^{1,2}, В.В. Калинин¹

¹Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

²Южный Федеральный Университет, Ростов-на-Дону, Россия

P.E.Timoshenko@GMail.com

Сегнетоэлектрические материалы благодаря своим уникальным нелинейным свойствам находят широкое применение в различных промышленно важных устройствах. Благодаря развитию микроэлектроники сегнетоэлектрические материалы все больше применяются в тонкопленочном исполнении. Нанесение пленки нелинейного материала на подложку приводит к изменению физических свойств пленки из-за разных величин термоупругих деформаций пленки и подложки. Этот факт дает возможность управлять свойствами пленки, меняя температуру нанесения тонкой пленки, подбирая материал подложки или ее ориентацию.

В работе представлена термодинамическая модель для пленки BST [1], нанесенной на кубическую подложку (001) среза, которая испытывает одноосную деформацию. Одноосная деформация приводит к аномальным изменениям материальных постоянных пленки. Наибольшие изменения происходят вблизи граничных значений деформации, характеризующих изменение фазового состояния пленки. Для фиксированной деформации несоответствия кристаллических решеток пленки и подложки вычислено поведение материальных постоянных при различной величине одноосной деформации [2].

С помощью пакета конечно-элементного моделирования COMSOL Multiphysics изучена возможность управления поверхностной акустической волной, возбуждаемой пленкой на ограниченной кремниевой подложке. Исследована генерация поверхностных акустических волн, возбуждавшихся в области двух частот 285 МГц и 522 МГц. В области частот первого ПАВ резонанса изменение частоты при одноосном растяжении происходило в пределах 3 МГц. Второй резонанс, 522 МГц, соответствует возбуждению ПАВ с традиционным согласованием периода ПАВ и ВПП. Изменение частоты происходило более значительное, более 10 МГц. Такое усиление зависимости закономерно, так как волна 522 МГц в большей степени, чем волна 285 МГц, локализована в пленке.

Полученные результаты могут лежать в основе разработки деформационных МЕМС устройств. При статических деформациях это могут быть ПАВ датчики деформации, в которых деформации, вызванные внешними силами, действующими на имеющиеся неподвижные детали конструкции, влияют на изменение частоты. При динамических изменениях это могут быть датчики, контролирующие через изменение частоты амплитуду или скорость колебаний балки, на поверхности которой расположен ПАВ резонатор.

Литература

- [1] V. B. Shirokov, Yu. I. Yuzyuk, B. Dkhil, and V. V. Lemanov, Phenomenological theory of phase transitions in epitaxial $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ thin films // Phys. Rev. B 79, 144118 (2009).
- [1] Shirokov V. B., Timoshenko P. E., Pan'kin A. V., Razumnaya A. G. Tunable electromechanical properties of a barium strontium titanate ferroelectric film under an uniaxial stress // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. -2020. – V.67 – P.2704-2709 . DOI: 10.1109/TUFFC.2020.3011591.

РАСЧЁТ УСТОЙЧИВОСТИ ДВУХЗВЕННОГО МАЯТНИКА КАПИЦЫ

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

¹ Институт Проблем Машиностроения РАН, Санкт-Петербург

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

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

В работе исследуется устойчивость движения перевёрнутого двухзвенного математического маятника в поле силы тяжести под действием вертикальной вибрации основания. Задача является обобщением примера маятника Капицы [1] и продолжает исследования, начатые в работе [2], где для нахождения области притяжения устойчивого решения применяются асимптотические методы [3].

В геометрически нелинейной постановке, для плоского движения в отсутствие силы трения и деформаций, в безразмерном виде движение маятников описывается системой уравнений

$$\begin{cases} 2\ddot{\varphi} + \ddot{\psi} \cos(\psi - \varphi) - \dot{\psi}^2 \sin(\psi - \varphi) + 2\varepsilon \sin(t + \beta) \sin \varphi - 2q\varepsilon^2 \sin \varphi = 0, \\ \ddot{\varphi} \cos(\psi - \varphi) + \ddot{\psi} + \dot{\varphi}^2 \sin(\psi - \varphi) + \varepsilon \sin(t + \beta) \sin \psi - q\varepsilon^2 \sin \psi = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ – углы отклонения от вертикали двух последовательно соединённых цилиндрическим шарниром математических маятников. Функция $\varepsilon \sin(t + \beta)$ задаёт вертикальные колебания основания, к которому шарнирно прикреплён нижний маятник. Колебания происходят с заданной малой по отношению к длине маятников амплитудой ε и некоторой начальной фазой β . Дестабилизирующее влияние силы тяжести даёт последний член в уравнениях, где $q\varepsilon^2$ равно квадрату отношения собственной частоты колебаний одиночного математического маятника около нижнего положения равновесия в поле силы тяжести в отсутствие колебаний точки закрепления к заданной частоте колебаний основания.

Для исследования медленных составляющих движения маятников вводится медленное время $\tau = \varepsilon t$ и применяется метод двухмасштабных разложений, искомые функции ищутся в виде рядов по малому параметру

$$\begin{aligned} \varphi(t, \tau, \varepsilon) &= \sum_{n=0}^{\infty} (\Phi_n(\tau) + \varphi_n(t, \tau)) \varepsilon^n, \quad \psi(t, \tau, \varepsilon) = \sum_{n=0}^{\infty} (\Psi_n(\tau) + \psi_n(t, \tau)) \varepsilon^n, \\ \tau &= \varepsilon t, \quad \int_0^{2\pi} \varphi_n(t, \tau) dt = 0, \quad \int_0^{2\pi} \psi_n(t, \tau) dt = 0, \quad n = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (2)$$

В работе получена нелинейная система дифференциальных уравнений медленных движений маятников, позволяющая в нулевом асимптотическом приближении найти область, в которой возможно движение маятников около верхнего положения равновесия в геометрически нелинейной постановке.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-51-S52001 МНТ-а).

Литература

- [1] Капица П.Л. Маятник с вибрирующим подвесом // Успехи физических наук. 1951. Т. 44. № 1, С. 7 – 20.
- [2] Belyaev A.K., Morozov N.F., Tovstik P.E., Tovstik T.M., Tovstik T.P. Classical Kapitza's problem of stability of an inverted pendulum and some generalizations // Acta Mechanica, 2021. Vol. 232. P. 1743 – 1759.
- [3] Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний – М.: ФИЗМАТЛИТ, 1958. – 408 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТИПА

Можгова Н.В., Лукин А.В., Попов И.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург
nmojgova@yandex.ru, lukin_av@spbstu.ru, popov_ia@spbstu.ru

В работе рассматривается задача о моделировании импульсного электродинамического излучателя цилиндрического типа. Излучатели такого вида могут быть использованы для гидрогеологических исследований морского дна [1]. Конструктивно импульсный электродинамический излучатель цилиндрического типа состоит из цилиндра, изготовленного из диамагнитного материала с высокой электропроводностью (меди), и индуктора, изготовленного из гибкого изолированного медного провода, герметизированного чехлом из эластомерного материала (резины). При подаче импульса тока на индуктор возникает сильное магнитное поле, распределенное вдоль окружности цилиндра, которое вызывает появление вихревого тока в поверхностном слое цилиндра. Взаимодействие вихревого тока с магнитным полем заставляет участки индуктора, расположенные на поверхности цилиндра, смещаться в радиальном направлении. После этого индуктор возвращается в исходное положение под действием разности давлений снаружи и изнутри чехла. В результате перемещений индуктора во внешней среде формируется одиночный импульс звукового давления.

На первом этапе моделирования были проведены гидроакустические оценки с целью определить верхние границы принципиально достижимых выходных параметров излучателя, обусловленные общими законами генерации и распространения волн в сжимаемой акустической среде (воде). Далее были разработаны различные конечно-элементные (КЭ) модели импульсного излучателя в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Первая КЭ модель включает в себя всю длину цилиндрического излучателя, а также воздушное пространство вокруг для корректного описания электромагнитных полей. Таким образом, решается задача распространения электромагнитного поля при протекании тока через индуктор, который включен в замкнутый LC-контур с источником питания в виде конденсатора. В результате решения данной задачи будет получена зависимость тока в индукторе от времени. На следующем этапе моделирования предлагается решать электромагнитную, механическую и акустическую задачи с импульсом тока в индукторе, полученным на первом этапе моделирования. Ввиду всесторонней связанности рассматриваемой задачи при моделировании полной трёхмерной модели излучателя с регулярной КЭ сеткой количество степеней свободы оказывается чрезвычайно большим, что приводит к нецелесообразным с точки зрения ресурсов расчетам. В качестве вычислительно эффективной альтернативы предлагается квази-плоская модель цилиндрического излучателя, представляющая собой тонкий слой исходной модели. Механические свойства гибкого провода получены на основе аналитических оценок многожильных проводов [2]. Пересчет амплитуды акустического давления с учетом реальной длины излучающей поверхности производится по аналитическому коэффициенту, представленному в литературе [3].

Литература

- [1] Н.А. Рой. Импульсные электродинамические излучатели // Акустический журнал, том 16, вып. 1, 1970. – С. 121–128.
- [2] Cao X., Wu W. The establishment of a mechanics model of multi-strand wire rope subjected to bending load with finite element simulation and experimental verification //International Journal of Mechanical Sciences. – 2018. – Т. 142. – С. 289–303.
- [3] Шендеров Е. Л. Волновые задачи гидроакустики. – Изд-во "Судостроение", 1972.

ОПИСАНИЕ ЭФФЕКТА РАЗМЯГЧЕНИЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ВОЗРАСТАЮЩЕЙ АМПЛИТУДОЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Кислицын В.Д.¹, Шадрин В.В.¹, Свистков А.Л.¹, Мохирева К.А.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

kislitsyn.v@icmm.ru, shadrin@icmm.ru, svistkov@icmm.ru, lyadovaka@icmm.ru

В работе рассмотрены сложные одноосные механические испытания с образцами полимерных нанокомпозитов, связующим которых является полиуретан на основе форполимера СКУ-ППЛ-2102. Данный эластомер имеет сложное строение: в нем имеются твердые доменные структуры, благодаря которым материал можно рассматривать как нанокомпозит со сложным механическим поведением. Испытания были проведены с образцами полиуретана без наполнителя и полиуретана, наполненного малослойным графеном в количестве 0.5 и 4 массовых частей.

Были осуществлены эксперименты с возрастающими циклами деформирования и продолжительными временными остановками перед сменой движения захватов. Такие испытания позволяют отслеживать степень размягчения материала в ходе нагружения и рост диссипативных потерь при разных кратностях удлинений.

Для моделирования упругих свойств материала с учетом эффекта размягчения Маллинза использовался упругий потенциал, в основе которого положено представление об эффективном поведении нагруженных полимерных цепей. Используемая модель упругого поведения позволяет учитывать связь макроскопических деформаций с эффективной деформацией активных полимерных цепей.

При описании вязкоупругого поведения эластомера было использовано обобщение математической модели, в основе которой лежит термодинамическая модель, изложенная в работе [1]. Эффект размягчения Маллинза учитывался как в упругом, так и в диссипативном слагаемых тензора напряжений Коши. И, согласно полученным данным, учет данного эффекта в модели оказывал больший вклад на диссипативное слагаемое тензора напряжений.

Получено, что, несмотря на малое содержание наполнителя, обнаружено значительное изменение механических свойств. Это видно даже при малом введении наполнителя в систему. Интересно также отметить, что при повторных деформированиях материала меньший вклад вносит диссипативная составляющая тензора напряжений, в то время как на участках предыдущего нагружения она имеет большую величину. Особенно это заметно в материале без наполнителя.

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы (рег. номер AAAA-A20-120022590044-7).

Литература

[1] Kislitsyn V.D., Svistkov A.L., Mokhireva K.A., Shadrin V.V. Determination of the inelastic behavior of viscoelastic materials using the new thermodynamic model // AIP Conference Proceedings. – 2022. В печати

КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ КОЛЬЦА, ПОДКРЕПЛЕННОГО УПРУГИМИ ТОНКИМИ СТЕРЖНЯМИ, НАХОДЯЩЕГОСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЕСОВОЙ НАГРУЗКИ

Андрюкова В.Ю.¹, Тарасов В.Н.¹

¹ Физико-математический институт ФИЦ Коми научный центр УрО РАН, Сыктывкар
veran@list.ru, vntarasov@dm.komisc.ru

Пусть упругое кольцо подкреплено тонкими стержнями (спицами), соединенными в центре и нагружено силой P . Обозначим через $w = w(\varphi)$ радиальное перемещение точек кольца, R - радиус кольца, B - жесткость на изгиб, E - модуль Юнга, F - площадь поперечного сечения спицы, n - число спиц. Предполагая, что число спиц настолько велико, что их можно считать упругой средой. В [1] получено дифференциальное уравнение $w'' + 2w''' + a^2 w' = 0$, где a^2 - константа, определяемая через R, B, E, F . Данная задача в такой постановке впервые была рассмотрена Н.Е. Жуковским, недостатком его подхода является то, что центр кольца считается неподвижным. Введем v - перемещение центра кольца. Тогда деформации могут быть определены путем решения вариационной задачи

$$J = \frac{B}{2R^3} \int_0^{2\pi} (w'' + w)^2 d\varphi + \frac{EF}{2R} \sum_{j=1}^n (w(\varphi_j) + v \sin \varphi_j)^2 - Pv \rightarrow \min_{w,v} \quad (1)$$

при ограничениях

$$(R - w) \cos \varphi - u \sin \varphi \geq R, \quad (2)$$

где $u(\varphi)$ - касательное перемещение точек кольца. Неравенство (2) означает, что кольцо находится над жестким препятствием. Если предположить, что спицы могут потерять устойчивость в результате сжимающих усилий, то задача сводится к негладкой вариационной проблеме

$$J = \frac{B}{2R^3} \int_0^{2\pi} (w'' + w)^2 d\varphi + \frac{EF}{2R} \sum_{j=1}^n (-w(\varphi_j) - v \sin \varphi_j)_+^2 - Pv \rightarrow \min_{w,v} \quad (3)$$

В (3) использовано обозначение $t_+ = \max\{0, t\} = \frac{|t| + t}{2}$. Усилия в спицах и изгибающий момент в кольце при решении задач (1) - (2) или (2) - (3) в несколько раз отличаются от аналогичных величин, приведенных в [1]. Другие задачи, сводимые к вариационным проблемам при наличии ограничений в виде неравенств, описаны авторами в [2].

Литература

- [1] Феодосьев В.И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов – Москва, 1967. – 376 с.
- [2] Andryukova V.Yu., Tarasov V.N. Nonsmooth problem of stability for elastic rings – Saint Petersburg, 2017. Abstracts of the international conference «Constructive nonsmooth analysis and related topics». Part I, p. 213–218.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ КОЛЛЕКТИВНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В АНСАМБЛЕ ВКЛЮЧЕНИЙ И УСЛОВИЯ ПЕРЕХОДА К ЛОКАЛИЗОВАННОМУ РАЗРУШЕНИЮ ОДНОНАПРАВЛЕННО АРМИРОВАННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

Зайцев А.В.¹, Кокшаров В.С.¹, Фукалов А.А.¹

¹*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
a-zaitsev@mail.ru, koksharovvs@gmail.com, mr_aa@mail.ru

Определение закономерностей коллективного взаимодействия в ансамбле включений и условий перехода к локализованному разрушению структурно-неоднородных материалов в элементах конструкций может быть проведено при комплексном экспериментальном исследовании неупругого поведения с детальным анализом эволюции дефектов, которое требует специального оборудования и осуществляется в настоящее время только для наиболее простых схем нагружения. В связи с этим, сформулировав критерии адекватности модельных и реальных случайных структур композитов, для различных сложных напряженно-деформированных состояний целесообразно проводить вспомогательные вычислительные эксперименты с представительными объемами этих материалов.

Синтез фрагментов структуры композитов, армирующими элементами которых являются цилиндрические волокна с параллельными случайно расположенными осями, заключался в размещении непересекающихся гладких круглых дисков на плоскости. Было установлено, что вид закона распределения диаметров волокон (одномодальный симметричный или несимметричный) не влияет на эффективные упругие модули стеклопластиков на основе эпоксидной матрицы, которые были определены для представительных объемов из вычислительных экспериментов по нагружению в поперечной плоскости, однородному растяжению в направлении армирования и антиплоскому сдвигу.

Определены масштабы неоднородности полей напряжений и деформаций в неповрежденном композите, отражающие многочастичное взаимодействие в ансамбле волокон и оказывающие решающее влияние на начальный этап образования дефектов. Обнаруженный принципиально разный характер многочастичного взаимодействия и принципиально разные условия перехода к локализованному макроразрушению волокнистых композитов при антиплоском сдвиге были объяснены «скрытыми» закономерностями (наличием или отсутствием в случайных полях структуры параметров порядка – периодических составляющих в интервале от половины до двух средних размеров гетерогенности), предопределяющими характер неоднородности полей напряжений и деформаций.

Для различных схем комбинированного трехосного пропорционального нагружения и сдвига определены закономерности эволюции дефектов в матрице, проанализировано влияние закона распределения диаметров волокон и «скрытых» параметров порядка стохастических структур на сценарии развития процесса разрушения. Проанализированы условия регистрации макроразрушения однонаправленно армированного композита, как результата потери устойчивости процесса накопления повреждений. Показано качественное совпадение характера макроразрушения модельных композитов в вычислительных экспериментах с результатами механического испытания на продольный сдвиг стеклопластика на основе эпоксидной матрицы. Обнаружен не зависящий от типа закона распределения диаметров волокон эффект «порционного» разрушения участков матрицы при гидростатическом сжатии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ–Урал № 19–41–590026).

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КРЫЛА НА ОСНОВЕ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ КОМПОЗИТНЫХ СТРУКТУР

Гришин В.И.¹, Марескин И.В.¹

¹ФАУ «ЦАГИ», Жуковский
mareskin.ivan@yandex.ru

Исследована концепция применения плетенных обшивок в про-бионических конструкциях отсеков, применительно к кессону крыла перспективного самолета малой авиации. Про-бионическая конструкция сформирована на основе жесткого ферменного каркаса из однонаправленных осесимметричных силовых элементов, сочлененного с сетчатыми композитными панелями, включающими плетенную обшивку. Подобная конструкция имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционной композитной конструкцией типа «black metal» с точки зрения восприятия нагрузок, включая ударные и климатические воздействия, за счет возможности создания многоуровневой системы защиты.

Для анализа эффективности предложенной конструкции в работе рассмотрены альтернативные варианты кессона крыла: традиционная металлическая конструкция с обшивочной КСС и гибридная конструкция на основе про-бионической КСС. В рамках гибридной конструкции плетенная обшивка частично включалась в работу при растяжении и сдвиге в зависимости от ее жесткостных характеристик, при этом обшивка не работала на сжатие.

Сравнительный анализ весовых и прочностных характеристик проводился с использованием специально разработанного двухуровневого алгоритма анализа прочности конструкции, адаптированного к подобным конструкциям [1]. В рамках данного алгоритма на первом уровне формируется упрощенная конечно-элементная модель (КЭМ) всего кессона, позволяющая адекватно определить нагруженность основных элементов конструкции. На втором уровне формируются более подробные модели каждого конструкционного элемента с учетом спектра и уровня его нагруженности. На этом уровне производится подетальный анализ прочности и устойчивости конструктивных элементов (стержневой осесимметричный элемент, фрагмент сетчатой панели).

Для корректного сравнения альтернативных вариантов конструкции было проведено оптимизационное исследование каждого из них. Задачей оптимизации являлось определение минимального веса каждого варианта конструкции кессона, при условии удовлетворения ограничений по прочности и устойчивости. В качестве оптимизационного инструмента использовался генетический алгоритм. В результате сравнительного анализа было получено, что применение предлагаемой гибридной КСС может позволить снизить вес конструкции по сравнению с традиционной до 15 %

Финансирование: Работа выполнена при поддержке РФФИ, номер проекта 19-29-13046.

Литература

[1] Shanygin A, Dubovikov, E, Fomin V, Mareskin I, Zichenkov M. Designing pro-composite truss layout for load-bearing aircraft structures. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2017;40:1612–1623. <https://doi.org/10.1111/ffe.12695>

ВЫБОР ПОВЕРХНОСТИ ПРИВЕДЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНО-АНИЗОТРОПНЫХ ПАНЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ ПО УТОЧНЁННОЙ ТЕОРИИ УСТОЙЧИВОСТИ

Гавва Л.М.¹, Митрофанов О.В.¹, Фирсанов В.В.¹

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

nio1asp@mail.ru, rva101@mail.ru

Разработка метода оптимального проектирования конструктивно-анизотропных панелей несущих поверхностей летательных аппаратов (ЛА) из композиционных материалов с ограничениями в соответствии с уточненной теорией потери устойчивости для реализации оптимального размерно-весового проекта – цель исследования.

Сформулировано аналитическое решение задачи оптимального проектирования для определения геометрических параметров эксцентрично подкреплённых плоских прямоугольных композитных панелей ЛА минимальной массы. Толщины слоёв и размеры элементов панели являются неизвестными переменными. Условие равноустойчивости составляет базис оптимального проекта. Общая изгибная и многоволновая крутильная формы потери устойчивости имеют одинаковую вероятность проявления, запас по устойчивости полагается близким к единице. Оптимальное проектирование сводится к исследованию целевой весовой функции как функции нескольких переменных на условный экстремум в строгой математической постановке с использованием аналитических методов в сочетании с численными методами.

Представлены соотношения новой математической модели для анализа потери устойчивости конструктивно-анизотропных композитных панелей. Научной новизной является развитие теории тонкостенных упругих стержней, связанное с проблемой контакта обшивки и стрингера с учётом деформации сдвига ребра при закручивании.

Панели находятся под действием распределенной постоянной сжимающей нагрузки, приложенной к кромкам в плоскости обшивки в продольном направлении. Предполагается, что краевые условия на контуре соответствуют частному случаю граничных условий для плоской задачи и задачи изгиба.

Аналитическое решение сводится к нахождению перемещений единой базисной поверхности приведения, которая может быть выбрана произвольно. В качестве расчетной модели предлагается схематизация панели как конструктивно-анизотропной, когда определяются критические силы общей изгибной формы потери устойчивости. Для исследования многоволнового крутильного выпучивания панели используется аппарат обобщенных функций с целью дискретного ввода жесткостей стрингеров. Решение дифференциального уравнения деформированной поверхности восьмого порядка в замкнутом виде построено в тригонометрических рядах.

Сформулирована постановка задач оптимального проектирования панелей, представлены численно-аналитические методы решения: метод золотого сечения, метод парабол, метод координатного спуска, метод штрафных функций, методы линейного и нелинейного программирования. Результаты оптимального проектирования с ограничениями, построенными в рамках уточнённой теории устойчивости, открывают возможности для снижения и оптимизации весовых характеристик элементов планера самолета.

Литература

- [1] Митрофанов О.В., Кайков К.В. Прикладные задачи проектирования композитных подкреплённых панелей при ограничениях по устойчивости и несущей способности. - М.: Издательство «Спутник +», 2017. – 64 с.
- [2] Gavva L M, Firsanov V V and Korochkov A N 2020 Buckling problem statement and approaches to buckling problem investigation of structurally-anisotropic aircraft panels made from composite materials *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 714(1) 012007

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЛОПАТКИ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С ДЕФЕКТАМИ

Шипунов Г.С.¹

¹*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

gsshipunov@gmail.com

В результате многолетнего опыта эксплуатации изделий из ПКМ известно, что несущая способность конструкций из ПКМ связана с повышением их консолидации, т. е. проформовки исходного препрега, от которого зависят эксплуатационные свойства изделия, обеспечивающие его трещиностойкость при статических нагрузках и последующую долговечность при повторно- переменных воздействиях [1]. Именно степень проформовки ПКМ лежит в основе обеспечения всех видов несущей способности любых конструкций из ПКМ, и является первоочередным параметром качества при изготовлении изделий из ПКМ. Анализу возникновения и влияния дефектов структуры ПКМ и их компонентов посвящено большое количество статей и монографий [2-6]. Поры и микротрещины определяют степень монолитности ПКМ, что в свою очередь влияет на трещиностойкость и эксплуатационные характеристики изделий из ПКМ. Стопроцентной проформовки изделий из полимерных композиционных материалов добиться невозможно. Снижение степени проформовки определяется исходными свойствами составных частей композита – волокна и матрицы. Процентное соотношение волокна к матрице, уровень технологических параметров зависящих от технологии изготовления конструкций из ПКМ (температура, давление, время и их соотношения), а также природа самих компонентов: наличие испаряющихся летучих компонентов, приводящих к образованию пор; изначальные и увеличивающиеся в процессе изготовления самого изделия разрывы микроволокон, не полная адгезионная связь на границе «волоконсвязующее» и др. факторы.

Таким образом в данной работе планируется оценить влияние технологических дефектов на механическое поведение конструкции лопатки спрямляющего аппарата из полимерных композиционных материалов.

Литература

1. Композиционные материалы: Справочник // В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др. – М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
2. Конструкции ракетных двигателей на твердом топливе // Под ред. Л.Н. Лаврова. – М.: Машиностроение, 1993. 215 с.
3. Мешков В.Е., Кулик В.И., Нилов А.С., Упитис З.Т., Сергеев А.А. Исследование механических характеристик однонаправленных композиционных материалов при статическом нагружении // Механика композит. Материалов – 1991 – Т.27, №3. С. 459-467.
4. Справочник по композиционным материалам: В 2 кн. Кн. 2. // Под ред. Дж. Любина; Пер. с англ. Под ред. Б.Э. Геллера –М.: Машиностроение, 1988. 584 с.
5. Аношкин А.Н., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Неупругое деформирование и разрушение однонаправленных волокнистых композитов // Механика композит. Материалов. – 1993. – Т.29, №5. – С. 621-628.
6. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел. – М.: Наука, 1984. 115 с.

Теоретико-экспериментальное исследование гибридной композит-металлической лопасти винта с интегрированными волокнами и технологии ее изготовления

Е.А.Пузырецкий¹, Л.П. Шабалин¹, В.И. Халиулин¹, П.А.Петров¹

¹ ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»

ea.puzyretskiy@mail.ru, leonid.shabalin@gmail.com, pla.kai@mail.ru, 13petrof@mail.ru

В современной авиации и судостроении практически достигнут предел по оптимизации лопастей винтов и увеличению их технических характеристик. Необходимы новые материалы, конструктивно-технологические решения, подходы к проектированию и расчетам.

Одним из перспективных направлений является применение гибридной композит-металлической лопасти с адаптивной жёсткостью. Такое изделие, благодаря эффективному сочетанию металлических и углеродных волокон, способно в процессе нагружения принимать оптимальную форму. Данный эффект достигается путём оптимизации схемы армирования отдельных областей лопасти. Металлические включения необходимы для обеспечения запаса прочности в области заделки и защиты законцовок.

Данное исследование посвящено разработке технологии изготовления композит-металлической лопасти и поиску рациональной схемы интеграции волокон. На рисунке 1 приведены основные этапы проектирования изделия.

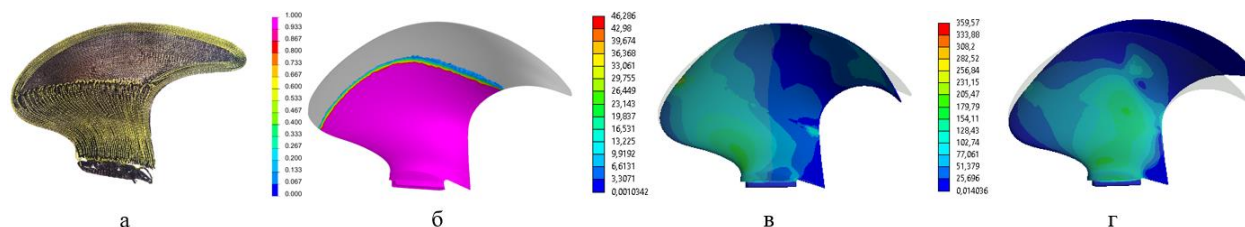


Рисунок 1 – Этапы проектирования гибридной композит-металлической лопасти винта с интегрированными металлическими волокнами. а – гибридная преформа; б – расчёт пропитки; в – расчёт остаточных технологических напряжений; г – расчёт напряжений в процессе эксплуатации

Проведена разработка цифрового двойника на этапах изготовления и эксплуатации с учётом технологической наследственности. Для построения и верификации расчётных моделей использовались современные программно-аппаратные средства измерения и диагностики, а также системы машинного зрения.

В перспективе, описанный подход может быть использован при создании интеллектуальной адаптивной лопасти на основе оптоволоконных средств мониторинга НДС и изменения жёсткости конструкции в реальном времени.

Описанная технология позволяет интегрировать как армирующие и диагностические волокна, так и нити с памятью формы.

Расчет процессов 3D печати композитной оснастки и трансферного формования сетчатых конструкций

В.И. Халиулин¹, Л.П. Шабалин¹, В.В. Батраков¹, Е.А. Пузырецкий¹

¹ ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»

pla.kai@mail.ru, leonid.shabalin@gmail.com, wwba@list.ru, ea.puzyretskiy@mail.ru

Построение виртуальных двойников и проведение технологических расчетов является необходимым этапом разработки изделий из композиционных материалов. Это позволяет спрогнозировать и оптимизировать параметры технологических процессов и обеспечить высокое качество и точность изготовления конструкций. Кроме того, проведение серии вычислительных экспериментов приводит к существенному сокращению временных и финансовых затрат за счет уменьшения количества натурных испытаний и отработки.

Основной особенностью расчета процессов изготовления является технологическая наследственность этапов. В данном исследовании рассматриваются следующие этапы технологического процесса:

Изготовление оснастки (рисунок 1 а,б): расчет послойной 3D печати заготовки оснастки наполненным композитным материалом с использованием роботизированного комплекса; моделирование усадки и остаточных напряжений; моделирование механической обработки и остаточных деформаций.

Изготовление сетчатой конструкции (рисунок 1 в, г): создание углеволоконной преформы однонаправленной лентой; нагрев оснастки с преформой с учетом нестационарного теплового поля; пропитка преформы связующим; оценка отверждение и коробления; упреждение оснастки на коробление.

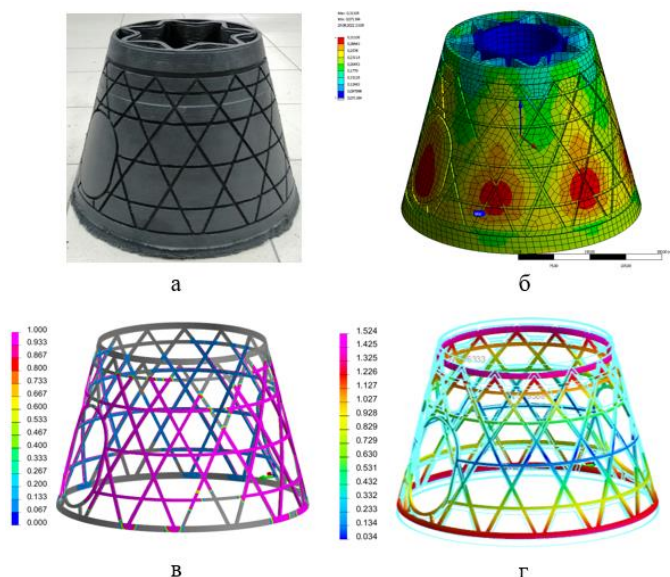


Рисунок 1 – Этапы исследования. а – изготовление оснастки; б – расчёт усадочных деформаций оснастки; в – расчёт пропитки изделия; г – расчёт коробления изделия

Результатом исследования является апробированный подход для построения и верификации расчётных моделей процессов 3D печати композитной оснастки и трансферного формования сетчатой конструкции. Используемая в исследовании методика может быть применена к любым конфигурациям оснасток и композитных конструкций.

ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ С ЗАДАННЫМ УРОВНЕМ НАДЁЖНОСТИ И УЧЁТОМ СТАТИСТИЧЕСКИХ РАЗБРОСОВ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ СЛОЁВ

Миронихин А.Н.

АО «Композит», г. Королёв Московская область
info@kompozit-mv.ru

В рамках настоящей работы сформулирована и решена задача оптимального проектирования многослойной оболочки, включающей слои из ортотропных композиционных материалов, при термосиловом нагружении в стохастической постановке, т. н. задача стохастического программирования. В качестве варьируемых параметров были выбраны толщины слоёв оболочки, а в качестве целевой функции – масса оболочки. Допустимая область поиска определялась геометрическими ограничениями на варьируемые параметры, тепловыми и прочностными ограничениями. При анализе напряжённо-деформированного состояния конструкции и вычислении прочностного ограничения использовался метод конечных элементов. При этом при выводе разрешающих уравнений для определения неизвестных напряжений применялся смешанный вариационный принцип Хеллингера-Рейснера [1].

При записи стохастической постановки прочностное ограничение заменялось ограничением вероятности безотказной работы конструкции и вводился вектор случайных величин, содержащий модули упругости E , модули сдвига G , коэффициенты Пуассона ν , технические константы линейного расширения α , пределы прочности при растяжении F^+ , сжатии F^- и сдвиге F . Каждая компонента данного вектора принималась нормально распределённой случайной величиной с известными математическим ожиданием и дисперсией:

$$\vec{Y} = \{E_r^{(i)}, \dots, G_{rz}^{(i)}, \nu_{rz}^{(i)}, \dots, \alpha_r^{(i)}, \dots, F_r^{+(i)}, F_r^{-(i)}, \dots\}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

$$Y_\xi \in N(\bar{Y}_\xi, S_{Y_\xi}^2), \quad \xi = 1, 2, \dots, \omega. \quad (2)$$

При построении детерминированного эквивалента стохастической задачи оптимизации вычислялось минимальное значение надёжности конструкции P_S с использованием метода Монте-Карло [2]. Для решения эквивалентной детерминированной задачи применялся метод внешних штрафных функций, для решения задачи безусловной минимизации использовался алгоритм Нелдера-Мида [3].

Решена задача оптимального проектирования теплонагруженной многослойной оболочки в стохастической постановке, получены зависимости оптимального значения весового критерия эффективности проекта от уровня разбросов физико-механических свойств материалов слоёв для различных значений вероятности безотказной работы.

Литература

- [1] Метод конечных элементов в механике твёрдых тел/ Под общей ред. А.С. Сахарова и И. Альтенбаха. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1982. – 480 с.
- [2] Райзер В.Д. Теория надёжности сооружений. Научное издание. – М.: Издательство АСВ, 2010. – 384 с.
- [3] Аттетков А.В., Галкин С.В., Зарубин В.С. Методы оптимизации: Учеб. для вузов/ Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 440 с.

ПРОБЛЕМА СИНГУЛЯРНОСТИ РЕШЕНИЙ В ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКЕ И МАТЕМАТИКЕ

Васильев В.В.¹, Лурье С.А.²

¹ Центральный НИИ специального машиностроения, Хотьково МО

² Институт прикладной механики РАН, Москва

vvvas@dol.ru, salurie@mail.ru

Предлагается модифицированная форма дифференциальных уравнений, описывающих физические процессы, традиционно рассматриваемые в прикладной математике и механике. Отмечается, что решения традиционных уравнений могут испытывать в особых точках разрывы первого и второго рода, не имеющие физической природы и не наблюдаемые экспериментально. При выводе новых уравнений, описывающих физические поля и процессы, рассматриваются не традиционные бесконечно малые элементы среды, а элементы, обладающие конечными размерами. В результате традиционные уравнения включают нелокальные функции осредненные по объему элемента и дополняются уравнениями Гельмгольца, устанавливающими связь между нелокальными и актуальными физическими переменными, которые являются гладкими функциями, не имеющими особых точек. В качестве приложений рассматриваются традиционно сингулярные задачи теории математической физики и теории упругости. Полученные решения сопоставляются с результатами экспериментов.

ИСКАЖЕНИЯ, МИКРОСТРУКТУРА И ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЕГМЕНТА, ВЫРАЩЕННОГО ПРОВОЛОЧНО- ДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ С ПОСЛОЙНОЙ ПРОКОВКОЙ

Келлер И.Э.^{1,2}, Трушников Д.Н.², Баяндин Ю.В.^{1,2}, Дудин Д.С.^{1,2}, Салихова Н.К.^{1,2},
Казанцев А.В.², Осколков А.А.², Пермьяков Г.Л.², Карташев М.Ф.²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
kie@icmm.ru

Аддитивное производство проволочно-дуговой наплавкой позволяет создавать легкие и прочные металлические конструкции сложной формы при значительной экономии материала. Для достижения характеристиками прочности и ресурса материала значений, присущих катаному металлу, разрабатываются эффективные технологии наплавки, последующей термообработки, а также послойной проковки или обкатки наплавленного слоя линейного элемента сегментированной конструкции. Для выбора рациональных параметров аддитивного производства линейной металлической заготовки проволочно-дуговой наплавкой с послойной проковкой требуется понимать закономерности формирования искажений формы, локализации пластической деформации, распределения остаточных напряжений, эволюции микроструктуры и характеристик прочности материала. Построена и верифицирована математическая модель упругопластического деформирования заготовки и эволюции поля температуры в термоцикле наплавки с расчетом эволюции микроструктур, с помощью которой решен ряд задач. Для этого определены пластические свойства металлических сплавов АМг6, ВТ6 и сталей 12Х18Н10Т и AISI 308 в широком диапазоне скоростей деформаций. Установлено, что с увеличением интенсивности обработки давлением линейного элемента его кривизна меняет знак, что необходимо учитывать при выборе режимов послойной проковки [1]. Обнаружено, что послойная проковка уменьшает на порядок остаточную пористость алюминиевых сплавов, что важно для повышения усталостного ресурса изделий [2], а для измельчения зерна этих материалов по механизму статической рекристаллизации, увеличивающего статическую прочность и пластичность изделий, необходима тройная проковка каждого слоя [3], что впоследствии было подтверждено экспериментально. Предложен новый способ экспериментального определения остаточных напряжений для образца в форме бруса, подвергнутого односторонней пластической деформации, основанный на нарезке слоев с поверхности и измерении их кривизн. Для оценки эффективности технологических процессов определялись стандартные характеристики прочности и пластичности выращенных материалов.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-19-00715.

Литература

- [1] Келлер И.Э., Казанцев А.В., Дудин Д.С., Пермьяков Г.Л., Карташев М.Ф. Искажение формы, локализация пластической деформации и распределение остаточных напряжений при односторонней проковке/обкатке бруса. Применение результатов к аддитивному производству шпангоута с послойной обработкой давлением // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14, № 4. – С. 434-443.
- [2] Келлер И.Э., Казанцев А.В., Дудин Д.С., Пермьяков Г.Л., Трушников Д.Н. Моделирование распределения остаточной пористости металлического изделия при аддитивном производстве с послойной проковкой // Проблемы прочности и пластичности. – 2022. – Т. 84, № 2. – С. 5-16.
- [3] Салихова Н.К., Дудин Д.С., Келлер И.Э., Осколков А.А., Казанцев А.В., Трушников Д.Н. Моделирование рекристаллизации сплава АМг6 в прокованном слое при наплавке материала в процессе гибридного аддитивного производства // Вычислительная механика сплошных сред. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 234-246.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ

Леканов М.В., Майер А.Е.

Челябинский государственный университет, Челябинск,
lemih1989@gmail.com

В работе представляется новый подход к решению задач о высокоскоростном деформировании металлических образцов. В основе метода лежит использование результатов обучения искусственной нейронной сети в качестве аппроксимационной функции для описания тензорного уравнения состояния вещества и определения порога нуклеации пластических дефектов. Данные для тренировки нейронной сети аккумулировались из молекулярно-динамического моделирования сжатия и растяжения алюминиевого образца вдоль различных траекторий деформации.

Из решения уравнения движения определяется градиент макроскопической деформации, градиент пластической деформации определяется как скорость изменения пластической дисторсии; зная градиенты полной и пластической деформации из известного соотношения [1] можно определить градиент упругой деформации и тензор конечных деформаций Грина, который полностью описывают упругодеформированное состояние вещества. Зависимостями между входным вектором параметров $\{L_1, L_2, L_3, E\}$ (здесь L_i – диагональные компоненты тензора Грина, E – внутренняя энергия системы) и выходным вектором с набором из пяти параметров $\{P^{nl}, S_1^{nl}, S_2^{nl}, S_3^{nl}, T\}$ (P^{nl} и S_i^{nl} это нелинейные поправки к давлению и компонентам девиатора, T – температура) можно полностью описать состояние системы в результате процесса деформирования.

Пластическая деформация описывается моделью на основе кинетики дислокаций [2]. В модели учитывается изменение количества дефектов в результате их образования, движения и иммобилизации. Модель пластичности дополнена функцией на основе машинного обучения ($\{L_1, L_2, L_3, E\}$ – входной вектор параметров и $\{Q_{DN}\}$ – параметр на выходе сети) для определения момента начала генерации новых дефектов и скорости их образования в случае для бездефектного монокристалла алюминия. Так же по различным траекториям деформирования, полученным из МД моделирования, проводилась идентификация параметров модели пластичности статистическим методом Байеса.

Описанный метод позволяет решать широкий круг задач о деформационном поведении материалов. В данной работе он применяется к высокоскоростному сжатию наноразмерных цилиндрических алюминиевых оболочек и к решению задачи о столкновении алюминиевых пластин миллиметровых размеров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-11-20153) [<https://rscf.ru/project/20-11-20153/>].

Литература

- [1] Khan, A.S., Liu, J., Yoon, J.W., Nambori, R. Strain rate effect of high purity aluminum single crystals: experiments and simulations – International Journal of Plasticity. – 2014. – 67, 39–52.
- [2] Mayer, A.E., Khishchenko, K.V., Levashov, P.R., Mayer, P.N. Modeling of plasticity and fracture of metals at shock loading – Journal of Applied Physics. – 2013. – 113, 193508.

МНОГОУРОВНЕВЫЕ КОНСТИТУТИВНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ: УЧЕТ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК

Шарифуллина Э.Р., Швейкин А.И., Трусов П.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

elvira16_90@mail.ru, shveykin@pstu.ru, tpv@matmod.pstu.ac.ru

Использование сверхпластичности (СП) является перспективным направлением развития технологий создания изделий сложной формы с хорошими физико-механическими и рабочими характеристиками. При этом даже в одноосных испытаниях с переходом к режиму структурной СП действуют и взаимодействуют несколько механизмов, наблюдается смена их ролей [1]. На ход процесса оказывают влияние исходные температурно-скоростные условия и характеристики структуры материала, в частности, форма и размер зерен, степень легирования, рекристаллизованности структуры после предварительной обработки.

Ранее авторами предложены многоуровневые конститутивные модели, описывающие изменение состояния структуры материала и учитывающие основные механизмы деформирования: внутризеренное дислокационное скольжение (ВДС), развороты кристаллических решеток зерен, зернограничное скольжение (ЗГС), динамическую рекристаллизацию (ДР), а также их взаимовлияние [1-3]. Взаимовлияние механизмов и аккомодационных процессов отражено в соотношениях для скоростей изменения критических напряжений внутризеренных и зернограничных сдвигов. Наличие в материале равноосной мелкозернистой структуры с преобладающей долей высокоугловых границ является важным условием для реализации деформирования в режиме структурной СП. Разработанные модели содержат описание размеров, формы, взаиморасположения кристаллитов и границ, а также их изменения в процессе деформирования с учетом ДР.

На основе детального физического анализа экспериментальных данных были модифицированы соотношения моделей, учитывающие влияние легирующих добавок на действующие механизмы в режиме структурной СП, а также переходных к нему стадиях. В частности, в моделях учитывается эволюция распределений малых прочных частиц Al_3Zr , малых непрочных частиц Al_3Li , больших прочных частиц Al_2LiMg , а также влияние частиц всех типов на ВДС, ЗГС, ДР и ротации кристаллитов.

Полученные результаты численных экспериментов по деформированию алюминиевых сплавов с выходом в режим СП удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена 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-2021-0012).

Литература

- [1] Трусов П.В., Шарифуллина Э.Р., Швейкин А.И. Многоуровневая модель для описания пластического и сверхпластического деформирования поликристаллических материалов // Физ. мезомех. – 2019. – Т.22, №2. – С.5–23.
- [2] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2019. – 605 с.
- [3] Shveykin A., Trusov P., Sharifullina E. Statistical crystal plasticity model advanced for grain boundary sliding description // Crystals. – 2020. – Vol. 10, № 9. – Pp. 1–18.

МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ С МЕДЬЮ

Красников В.С., Майер А.Е., Фомин Е.В., Погорелко В.В., Безбородова П.А., Латыпов Ф.Т.,
Эбель А.А.

Челябинский Государственный Университет, Челябинск

vas.krasnikov@gmail.com

В работе развивается многомасштабный подход к описанию пластической деформации алюминиевых сплавов, включающий молекулярно-динамический (МД), континуальный и подход дискретной дислокационной динамики (ДДД). На МД уровне исследуется движение и генерация дислокаций в алюминии, содержащем упрочняющие включения, характерные для Al-Cu системы. Исследуются как классические типы упрочняющих включений, так и гибридные, зарегистрированные при детальном анализе электронно-микроскопических изображений в последнее десятилетие. Показано, что в условиях высокоскоростной деформации ($\geq 10^6 \text{ с}^{-1}$) наиболее часто реализуемыми механизмами взаимодействия дислокаций с включениями является перерезание и образование петли Орована. Определены размеры разных типов включений, для которых наблюдается переход от перерезания к образованию петли Орована. Продemonстрировано, что при накоплении пластической деформации в системе при многократном прохождении дислокации даже для прочных включений, например θ' фазы, наблюдается переход от формирования петли Орована к перерезанию.

Полученные МД данные обобщаются с помощью континуальных моделей, описывающих основные процессы, наблюдаемые на атомарном уровне, что позволяет далее их использовать на более высоком структурном уровне. Для описания механического отклика представительного объема сплошной среды предложена двумерная схема ДДД. Расчетная область содержит большое число дислокаций и упрочняющих включений. Взаимодействие между дислокациями и включениями описывается с помощью ранее предложенных моделей, откалиброванных на МД данных. Размеры включений задаются в соответствии с логнормальным распределением, наблюдаемым в реальных сплавах.

Проведены исследования зависимости напряжения течения сплава в зависимости от типа упрочняющих включений, распределения частиц по размерам и температуры. Полученные значения напряжения течения, коэффициентов температурного разупрочнения достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными по динамической сдвиговой прочности алюминиевых сплавов. Проведенные исследования зависимости напряжения течения от характерного размера упрочняющих частиц адекватно отражают наблюдаемые в эксперименте величины и тенденции с учетом экспериментальной погрешности. Продemonстрировано, что при фиксированной концентрации легирующих атомов, большую сдвиговую прочность и меньшую склонность к пластической локализации демонстрируют сплавы с мелкими упрочняющими включениями. Показано, что с ростом пластической деформации возможно разрушение упрочняющих включений с последующим снижением вклада включений в общее напряжение течения сплава. Установлен эффект гибридизации θ' фазы, выражающий в росте сдвиговой прочности на 35% при постоянной концентрации атомов меди

РАСЧЕТ ФОРМЫ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ РАЗДАЧИ СРЕДНЕЙ ЧАСТИ ТРУБЫ ПО ЖЕСТКОЙ МАТРИЦЕ

Бормотин К.С.¹, Потянихин Д.А.¹, Мин Ко Хлайнг¹, Синельщиков А.А.¹

¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре
cvmi@knastu.ru, potyanikhin@mail.ru, minkohlaing53@gmail.com, aa.sinelshchikov@mail.ru

В современном машиностроении в целом, и в авиастроении в частности, большое количество деталей получают листовой штамповкой. Для изготовления элементов гидрогазовых систем летательных аппаратов часто применяются формообразующие операции, в которых жидкости и резиноподобные материалы служат рабочей средой, передающей усилие прессования деформируемой заготовке.

В настоящей работе рассматривается процесс раздачи средней части трубчатой заготовки из титанового сплава ОТ4-1 [1]. Внутреннее давление на трубчатую заготовку определяется действием рабочего тела при сжатии. Одним из значительных недостатков холодной листовой штамповки является пружинение материала после извлечения из оснастки. Поэтому форма матрицы, используемой для технологического процесса раздачи, должна задавать упреждающую форму трубчатой заготовки, обеспечивающую требуемую остаточную форму после разгрузки. Для определения такой формы матрицы формулируется и решается обратная задача.

Реализация метода решения обратной задачи выполнена в системе MSC.Marc. Для осесимметричной формы детали используется двумерная постановка задачи. В случае тонкостенных конструкций моделирование процесса формообразования выполняется в условиях пластичности с учетом малых деформаций, но больших перемещений и поворотов (общая Лагранжева формулировка). Решение обратной контактной задачи формообразования находится итерационным методом, который построен на основе квазистатического вариационного принципа [2,3]. Данный алгоритм решения обобщается на трехмерные задачи, когда деталь имеет неосесимметричную форму, например, тройник, ступенчатый патрубок, патрубок с эллипсоидальным поперечным сечением и т.д.

В результате решения обратной контактной задачи формообразования трубчатой заготовки итерационным методом, была определена требуемая геометрия жесткой матрицы. Сравнение численных результатов с проведенным натурным экспериментом показало удовлетворительное совпадение. Таким образом, представленный метод и его реализация в САЕ-системе дает возможность проектировать оснастку на стадии подготовки производства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-11-00165).

Литература

- [1] Потянихин Д.А., Синельщиков А.А., Мин Ко Хлайнг. Моделирование напряжённо-деформированного состояния трубчатой заготовки при раздаче средней части по жёсткой матрице // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-2 (52). – С. 105-110.
- [2] Бормотин К.С., Вин Аунг. Метод решения обратной задачи в процессе обтяжки панели // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2018. – № 3 (37). – С. 47-57.
- [3] Бормотин К.С. Метод решения обратных задач неупругого деформирования тонкостенных панелей // Вычислительные методы и программирование. – 2017. – Т.18. – С. 359-370.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ НА ЛИТЕЙНО-КОВОЧНОМ МОДУЛЕ С ОДНИМ ПОДВИЖНЫМ БОЙКОМ

Одинокое В.И.¹, Дмитриев Э.А.¹, Потянихин Д.А.¹, Евстигнеев А.И.¹, Квашнин А.Е.¹

¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре
79122718858@yandex.ru, rector@knastu.ru, potyanikhin@mail.ru, diss@knastu.ru,
kvashnin_ae@mail.ru

Изобретение В. И. Одинокое [1] положило начало циклу экспериментальных и теоретических работ по исследованию совмещенных процессов литья и деформирования металлов в заданный профиль, реализованных конструктивно в одном устройстве в виде кристаллизатора с подвижными стенками, приводимыми в движение эксцентриковыми валами. В настоящей работе представлено теоретическое исследование процесса деформирования алюминиевого сплава на литейно-ковочном модуле вертикального типа новой конструкции [2]. В отличие от устройства [1], новая модификация содержит только один подвижный боковой боек, а второй заменен на неподвижную водоохлаждаемую плиту.

Решение задачи о деформировании металла производится в два этапа. На первом этапе решается задача теплопроводности, на втором этапе – задача об определении напряженно-деформированного состояния с учетом найденного поля температур.

Поведение материала полагается вязкопластическим, механические свойства зависят от температуры. Учитывается, что в зависимости от температуры, металл может находиться в жидком или твердом фазовом состоянии. Математическая модель описана в работе [3]. На границах контакта металла с оснасткой выполняется теплообмен, учитывается контактное трение.

Алгоритм решения задачи предполагает разбиение цикла поворота эксцентрикового вала на определенное количество шагов; шаг по времени соответствует углу поворота бойка. Расчетная область разбивается системой ортогональных поверхностей на элементы конечных размеров; для каждого элемента система модельных соотношений записывается в разностном виде и решается по разработанному алгоритму [4] с учетом граничных условий.

В результате проведенных вычислительных экспериментов были получены поля распределения температуры, напряжений и деформаций в области деформирования металла.

Литература

- [1] Одинокое В. И. Патент № 2041011 С1 Российская Федерация, МПК В22Д 11/051, В22Д 11/04. Устройство для непрерывного литья заготовок: № 92007791/02: заявл. 24.11.1992: опубл. 09.08.1995, заявитель ИМиМ ДВО РАН.
- [2] Одинокое В. И., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Потянихин Д.А., Лошманов А.Ю., Квашнин А.Е. Патент № 2769679 С1 Российская Федерация, МПК В22Д 11/051. Устройство для получения непрерывнолитых деформированных заготовок: № 2021123605: заявл. 05.08.2021: опубл. 05.04.2022; заявитель ФГБОУ ВО "КнаГУ".
- [3] Одинокое В.И., Ловизин Н.С., Скляр С.Ю.. Моделирование процесса деформации металла на литейно-ковочном модуле // Математическое моделирование. – 2010. – №10. – С. 129-145.
- [4] Одинокое В.И., Каплунов Б.Г., Песков А.В., Баков А.В.. Математическое моделирование сложных технологических процессов. – Москва: Наука. – 2008. – 176 с.

МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ КОМПОЗИТОВ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

Мохирева К.А.¹, Свистков А.Л.¹, Шадрин В.В.^{1,2}, Соколов А.К.¹, Возняковский А.П.³

¹Институт механики сплошных сред, Пермь

²Пермский государственный университет, Пермь

³Научно-исследовательский институт синтетического каучука им. С.В. Лебедева, Санкт-Петербург

lyadovaka@icmm.ru, svistkov@iccm.ru, shadrin@icmm.ru, sokolov.a@icmm.ru, voznap@mail.ru

В данной работе были исследованы материалы, связующими которых выступал полиуретан на основе форполимера СКУ-ППЛ-2102. В качестве наполнителей использованы: 1) малослойный графен, полученный из биополимеров по СВС технологии [1]; 2) многостенные нанотрубки; 3) алмазная шихта (детонационные алмазы). Содержание наполнителя в композитах составляло 0.5, 1 и 4 массовых частей.

Для анализа механического поведения рассматриваемых материалов использовались как классические эксперименты, так и эксперименты со сложными историями нагружения. По результатам исследований, даже небольшое введение наполнителя приводит к существенному изменению механических свойств. При этом происходит уменьшение жесткости материала. И чем больше наполнителя в системе, тем композит менее жесткий. А это нестандартное явление с точки зрения механики композиционных материалов. Также эксперименты показали, что на большую величину возрастают разрывные деформации материалов с наполнителями по сравнению с полиуретаном без наполнителя. Для ряда композитов существенно возросли истинные напряжения в момент разрыва образца.

Чтобы изучить особенности разрушения материалов был проведен цикл испытаний на раздир. Установлено, что на стадии медленного роста в материале без наполнителя макроразрыв незначительно увеличивает свой размер. А когда наступает стадия быстрого роста, образец мгновенно разделяется на части. В материалах с нанонаполнителями значительно дольше происходил рост макроразрывов, а на медленной стадии роста они прорастали на существенно большую величину.

Для объяснения эффекта уменьшения жесткости полиуретана и замедлении роста макроразрыва при введении в него наполнителя были проведены численные расчеты. Была выдвинута гипотеза, что около поверхности частиц имеет место сильное размягчение материала. В рамках предложенной нами модели можно объяснить появление тяжей, которые сошьют берега макроразрыва и затормозят его движение. А также это позволяет объяснить уменьшение жесткости полиуретана при введении в него наполнителя любого типа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596013 и в рамках госбюджетной темы (рег. номер АААА-А20-120022590044-7).

Литература

[1] Возняковский А.А., Возняковский А.П., Кидалов С.В., Осипов В.Ю. Структура и парамагнитные свойства графеновых нанопластин, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из биополимеров // Журнал Структурной Химии – 2020. – Т. 61, № 5. – 2020. – с. 869-878.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ ПКМ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ОДНОСТЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Ковтунов С.С.¹, Насонов Ф.А.², Турбин Н.В.¹

¹ МАИ, НПО-101, г. Москва, Россия

² МАИ, г. Москва, Россия

kovtunov.99@inbox.ru

В данной работе разработан новый нано-материал, матрицей служит эпоксидная смола низкой вязкости АСМ-12Р, волокной является UMT-49S-12K-EP, наномодификатором являются одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) Tuball Matrix 201. Целью работы является разработка и исследование нового конструкционного полимерного композиционного материала с улучшенными механическими и физическими характеристиками, за счёт модифицирования матрицы ПКМ углеродными нанотрубками, для применения в перспективных авиакосмических конструкциях повышенной надежности, безопасности, энергоэффективности и функциональности.

В соответствии с целью в работе выполнены следующие задачи:

- Определение вязкости матрицы при помощи роторного вискозиметра.
- Исследование кинетики протекания реакций отверждения и релаксационных переходов в матрице ПКМ при помощи ДСК.
- Определение температуры стеклования матрицы ПКМ при помощи ДМА. [1]
- Определение плотности матрицы РСМ методом гидростатического взвешивания.
- Выявление оптимальных параметров диспергирования ОУНТ в полимерной матрице ультразвуковым методом.
- Изготовление панелей ПКМ методом VaRTM.
- Определение статических прочностных и жесткостных характеристик элементарных образцов посредством испытаний на растяжение и межслоевой сдвиг [2,3].
- Исследование усталостной прочности элементарных образцов посредством испытаний на циклическое растяжение.
- Анализ деградации жесткости полученных материалов статическим и динамическим методами определения.
- Определение объемной доли волокна и объемного содержания пор путем травления РСМ в серной кислоте.
- Контроль качества ПКМ посредством неразрушающего контроля и оптической микроскопии.

Литература

- [1] CSN EN 6032 Aerospace series - Fibre reinforced plastics - Test method - Determination of the glass transition temperatures (2015).
- [2] Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.
- [3] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАРЯДА НА ФОРМИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА КАРБОНИЗИРОВАННОГО СЛОЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРА ПРИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ

Беляев А.Ю.¹, Изюмов Р.И.¹, Свистков А.Л.¹

*«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» – филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ИМСС УрО РАН»), Пермь
belyaev@icmm.ru, izumov@icmm.ru, svistkov@icmm.ru*

Ионно-плазменная обработка полимеров является перспективным направлением в создании нанокompозитных материалов. Такая обработка позволяет создавать на поверхности полимеров специфический слой с особыми физико-механическими свойствами. Получение таких слоев интересно с практической точки зрения. Во-первых, высокое содержание углерода говорит о возможности получения электропроводящих слоев. Во-вторых, слой имеет достаточно высокую жесткость, в сравнении с исходным материалом. В-третьих, слой имеет уникальные биофизические свойства, что коренным образом меняет поведение посаженных на обработанный материал биологических объектов (клетки, молекулы протеина, бактерии).

Образовавшийся слой принимает волнистую форму. Амплитуда и ширина волн зависят от энергии обработки, накопленной дозы ионов и, судя по всему, от жесткости исходного материала. От полученного рельефа зависит трещиностойкость слоя и шероховатость поверхности. Оба фактора имеют значение при взаимодействии с биологическими объектами. В связи с этим возникает фундаментальная задача: объяснить причины образования волнообразного рельефа и научиться контролировать этот процесс для получения подходящих физико-механических свойств полученного материала.

В работе рассматривается гипотеза происхождения волнообразного рельефа на поверхности полиуретана, обработанного плазмой. Выдвинуто предположение, что напряжения и деформации возникают из-за накопленного в приповерхностном слое одноименного заряда. Так как ионы, которыми обрабатывается поверхность, имеют одноименный заряд, можно предположить, что при определенной накопленной дозе, плотность заряда примет критическое значение, при котором силы электростатического отталкивания будут способны вызвать значительные напряжения и деформации материала в приповерхностном слое и произойдет потеря устойчивости.

Предложена методика расчета напряжений при условии равномерного распределения заряда. Проведен расчет, показывающий зависимость величины напряжений от энергии и накопленной дозы. Показано, что потеря устойчивости и, как следствие, возникновение волн на поверхности материала, характерно для низкомолекулярных полимеров. Проведено сравнение результатов расчета с реальными снимками поверхностей образцов после обработки, полученных с помощью оптического и атомно-силового микроскопов. Сделаны выводы о состоятельности выдвинутой гипотезы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00574).

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ КРИТИЧЕСКИХ РАССТОЯНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ КОМПОЗИТОВ

Муллахметов М. Н., Лобанов Д. С., Янкин А. С.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
m.mullahmetov59@gmail.com, cem.lobanov@gmail.com, cem.yas@yandex.ru

В ходе работ были проведены квазистатические испытания на растяжение плоских образцов из конструкционного стеклотекстолита СТЭФ. Помимо проведенных экспериментов также было проведено численное моделирование процессов растяжения данных образцов с использованием программы ANSYS. Исследуемые образцы представляли из себя полоски без концентраторов напряжений и с концентратором в виде V-образных вырезов с различным радиусом скругления в вершине концентратора. Полученные результаты использовались для оценки прочности поврежденного материала по теории критических расстояний. Целью работы является исследование влияния структурных дефектов на прочностные свойства конструкционных композитных материалов [1-3].

По результатам работы получены значения критических расстояний [4, 5], которые указывают на размеры дефектов, при которых не наблюдается значительное снижение прочностных характеристик исследуемого материала. Для анализа прочностных характеристик используются расчетные значения линеаризованных главных напряжений, полученные при расчете в ANSYS, а также, полученное экспериментальным путем, значение предела прочности. Для анализа результатов применялись два подхода теории критических расстояний: точечный и линейный. При этом полученные результаты показали, что линейный подход позволяет более точный прогноз прочностных характеристик, чем точечный.

Работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке РФФИ (проект № 21-79-10205, <https://rscf.ru/project/21-79-10205/>).

Литература

- [1] Lobanov D.S., Babushkin A.V., Luzenin A.Yu. Effect of increased temperatures on the deformation and strength characteristics of a GFRP based on a fabric of volumetric weave// *Mechanics of Composite Materials*, — 2018 — Vol. 54 — No. 5 — pp. 655-664
- [2] Strungar E., Lobanov D., Wildemann V. Evaluation of the sensitivity of various reinforcement patterns for structural carbon fibers to open holes during tensile tests (2021) *Polymers*, 13 (24), art. no. 4287. DOI: 10.3390/polym13244287
- [3] Исследование развития технологического дефекта в конструкционном углепластике методами корреляции цифровых изображений и акустической эмиссии в условиях сложнапряженного состояния / Д. С. Лобанов, Е. М. Струнгарь, Е. М. Зубова, В. Э. Вильдеман // *Дефектоскопия*. – 2019. – № 9. – С. 3-10. – DOI 10.1134/S013030821909001X. – EDN VIPUPS.
- [4] J. M. Whitney, R. J. Nuismer, Stress Fracture Criteria for laminated composites containing stress concentrations, *Journal of Composite Materials*, 1974.
- [5] B. Gillham, A. Yankin, F. McNamara, C. Tomonto, D. Taylor, R. Lupoi, Application of the Theory of Critical Distances to predict the effect of induced and process inherent defects for SLM Ti-6Al-4V in high cycle fatigue, *CIRP Annals*, 70.

ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫЙ ОБЪЕМ И ЭФФЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТАТИСТИЧЕСКИ ОДНОРОДНО АРМИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ КОМПОЗИТОВ

Пестренин В.М., Пестренина И.В., Фагалов А.Р., Пелевин А.Г.

Пермский государственный университет, Пермь

pestreninvm@mail.ru, ipestrenina@gmail.com, slowards@gmail.com, pelevin.a@icmm.ru

В настоящее время исследователи придерживаются определения представительного объема (representative volume element – RVE), предложенного Drugan W.J., Willis, J.R. [1]: «Это наименьший элемент объема материала композита, для которого обычные макроскопически однородные определяющие модели «эффективного модуля» могут быть применены». Задача определения RVE конкретных композиций наряду с их эффективными материальными характеристиками представляется важной по следующим причинам: достоверные эффективные материальные характеристики определяются на образце, не меньшем, чем RVE; характерный размер RVE ограничивает размер сетки дискретизации при численном исследовании; дегомогенизация состояния композитного материала является решением задачи микромеханики о напряженно деформированном состоянии RVE; существование RVE для композита является критерием для применения теории эффективного модуля к анализу его напряженно деформированного состояния.

В работе предлагается следующий итерационный алгоритм построения RVE и эффективных материальных характеристик для композиций периодической структуры. Из композита выделяется последовательность кубических образцов с возрастающим характерным размером, состоящих из ячеек периодичности. Предполагается (метод от противного), что каждый образец этой последовательности является представительным объемом. Тогда для него может быть построено решение задачи микромеханики. На основе этого решения определяются макроскопические свойства образца. Результаты вычислений макроскопических материальных параметров и выполнение условий симметричности матрицы жесткости для очередного кубического образца сравниваются с соответствующими данными для предыдущего образца и сопоставляются с сущностными признаками представительного объема. На основании этих действий делается вывод о возможности (или невозможности) признания рассматриваемого образца в качестве представительного объема. Последовательности значений вычисленных параметров и значения процента отклонения матрицы жесткости от симметричности оказываются сходящимися. Тот куб объявляется RVE, для которого полученные характеристики могут быть приняты за предельные значения. Они и принимаются за эффективные материальные характеристики композиции. Эффективные константы сравниваются с решением рассматриваемой задачи с условиями периодичности на ячейке.

Подход распространяется на задачу моделирования статистически однородно армированного непрерывными прямыми волокнами материала композитом периодической структуры.

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

Литература

[1] Drugan W.J., Willis J.R. (1996) A micromechanics-based nonlocal constitutive equations and estimates of representative volume element size for elastic composites. J. Mech. Phys. Solids 44, 497–524

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНОГО СЛОЯ, СФОРМИРОВАННОГО НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИУРЕТАНА ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ ПРИ РАЗНЫХ УГЛАХ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ

Иванов Я.Н.¹, Чудинов В. С.^{1,2}, Шардаков И. Н.², Беляев А. Ю.²,

Морозов И. А.²

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

jaroslavrussia@gmail.com

Ионно-плазменные методы обработки широко используются для изменения свойств поверхности полимерных материалов. Материалы после плазменной модификации применяются в гибкой электронике, медицинских, космических и различных других сферах деятельности человека [1, 2]. Особый интерес представляет метод имплантации ионов газовой среды, вследствие применения которого на поверхности полимера образуется углеродный нанослой, физические и химические свойства которого отличаются от свойств исходного материала [3]. Стоит отметить, что при обработке конкретного изделия, поверхность которого имеет криволинейную форму, имплантация ионов будет происходить под разными углами к поверхности. Т.е. угол наклона потока ионов тоже может повлиять на изменение свойств поверхности материала.

Данная работа посвящена исследованию механических, структурных и прочностных характеристик углеродного слоя, полученного методом имплантации ионов азота высокой энергии под разными углами к поверхности полиуретана.

Структурные и механические свойства карбонизированного слоя были исследованы с помощью атомно-силовой микроскопии. С помощью макромеханических испытаний на одноосное растяжение был определен модуль упругости углеродного слоя. Статическую прочность карбонизированного слоя изучали с помощью одноосно растягивающего устройства, встроенного в цифровую систему оптической микроскопии. Исследована морфология поверхности карбонизированного слоя после испытаний на прочность. По результатам исследований получены характеристики жесткости, прочности и морфологии поверхности углеродного слоя, сформированного при разных дозах и углах ионного пучка к поверхности образца.

Показано, что угол имплантации ионов влияет на морфологию поверхности углеродного слоя, но не оказывает значительного влияния на его модуль упругости. Статическая прочность возрастает по мере уменьшения угла падения ионного пучка и дозы ионов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00108, <https://rscf.ru/project/22-19-00108/>.

Литература

- [1] Levchenko I et al. Plasma and Polymers: Recent Progress and Trends. Molecules. 26(13), 2021.
- [2] Mohan V et al., Plasma polymerised thin films for flexible electronic applications, Thin Solid Films, 546, 2013, 167-170 cc.
- [3] Ion beam treatment of polymers application aspects from medicine to space. A. V. Kondyurin, M. Bilek. Amsterdam, Elsevier, 2015. – 268 c.

УДАРНАЯ ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Сапожников С.Б.^{1,2}

¹ ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск, Россия,

² ФАУ «ЦАГИ», г. Жуковский, Россия

sapozhnikovsb@susu.ru

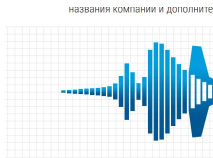
Сочетание низкой плотности и экстремальной анизотропии (высокого модуля упругости и предела прочности в направлении укладки волокон в однонаправленных композитах и низких трансверсально-сдвиговых характеристик) позволяет проектировать авиакосмические конструкции высокого весового совершенства. Однако случайные локальные ударные воздействия в процессе эксплуатации (бетонной крошкой при взлёте, градом или инструментом при обслуживании) и возникающие при этом скрытые повреждения типа расслоений и разрывов волокон приводят к необходимости увеличения толщины композита, чтобы возникший дефект не привёл к катастрофическому разрушению конструкции при штатной эксплуатации. Рост толщины приводит к резкому снижению весовой эффективности и уже более 30 лет подогревает интерес к развитию методов обнаружения скрытых дефектов в композитах, технологиям трансверсально-сдвигового упрочнения и расчётным методам, позволяющим проводить анализ деформирования и разрушения на разных масштабных уровнях при локальном ударе (в системе SCOPUS на эту тему индексировано более 5000 статей).

Способы обнаружения скрытых дефектов в слоистых композитах делят на ручные и автоматизированные, «полевые» и локальные, пассивные и активные, визуальные и инструментальные. Большими перспективами обладают методы, основанные на интегрированных в конструкции волоконно-оптических сенсорах, а также индикаторных покрытиях. Отмечено, что достаточную точность и оперативность инспекции может обеспечить сочетание полевых автоматизированных и ручных локальных способов.

Проведён анализ прямых и косвенных методов трансверсально-сдвигового упрочнения слоистых полимерных композитов для снижения размеров скрытых дефектов до безопасного уровня. Среди них можно выделить методы инжиниринга межслоевого интерфейса тонкими прокладками, модификацию матричного полимера наночастицами, Z-армирование тонкими стержнями или нитями (пиннинг и тафтинг), сквозную прострочку и иглопробивные методы для сухих преформ (фелтинг). Серьёзное внимание в литературе уделяется также методам трёхмерного армирования непрерывными нитями.

Развитие методов оценки прочности слоистых композитов при локальном ударе прошло несколько этапов, начиная с экспериментальных исследований на конкретных материалах и конструкциях (около 80% опубликованных статей в журналах системы SCOPUS) и заканчивая комплексными расчётно-экспериментальными подходами с широким привлечением современной вычислительной техники, программного обеспечения (пакеты конечно-элементного анализа) и пользовательских моделей разрушения, учитывающих возникновение различных механизмов повреждения (около 20% опубликованных статей).

В обзоре отмечается, что лишь расчётные модели материалов, учитывающие прямым или косвенным способом внутри- и межслойную сдвиговую нелинейность, накопление повреждений в волокнах и матрице на границе с волокнами позволяет адекватно прогнозировать результаты локального удара и его влияния на остаточную прочность. Иными словами, для каждого механизма разрушения должны быть записаны условия развития поврежденности с минимальным набором параметров. Важную научно-методическую задачу представляет разработка рациональных методов определения этих параметров с учётом особенностей численной реализации, а также гомогенизации структуры композита при переходах с одного масштабного уровня на другой.



МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ МЕХАНОДИФфуЗИОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ОРТОТРОПНОМ ПОЛОМ ЦИЛИНДРЕ С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ ДИФфуЗИОННЫХ ПОТОКОВ

Зверев Н.А.¹, Земсков А.В.^{1,2}

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва

²НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
nik.zvereff2010@yandex.ru, azemskov1975@mail.ru

Развитие производства материалов и конструкций, работающих в условиях нестационарного взаимодействия полей различной физической природы, повлияло на то, что ученых, работающих в этой и смежных областях, все больше стали привлекать модели механики связанных полей и, в частности, модели механодиффузии.

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 механодиффузии, основанная на феноменологических подходах и моделях термодинамики и механики сплошной среды [1,2].

В работе рассматривается одномерная задача механодиффузии для полого ортотропного многокомпонентного цилиндра, находящегося под действием внешнего давления, которое равномерно распределено по его внутренней и внешней поверхностям. Математическая модель включает в себя систему уравнений упругой диффузии в цилиндрической системе координат, в которой учтены релаксационные диффузионные эффекты, подразумевающие конечные скорости распространения диффузионных процессов [3,4].

Задача решается методом эквивалентных граничных условий [5]. Для этого рассматривается вспомогательная задача, решение которой получается с помощью разложения в ряды по собственным функциям упругодиффузионного оператора. Далее строится соотношение, связывающее правые части граничных условий обеих задач, которое представляет собой интегральное уравнение, решение которого ищется с помощью квадратурных формул. Рассмотрен расчетный пример для трехкомпонентного полого цилиндра.

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] Зверев Н.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Моделирование нестационарных связанных механодиффузионных процессов в изотропном сплошном цилиндре // Проблемы прочности и пластичности. – 2020. – Т.82, №2. – с.156–167.
- [4] Зверев Н.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Нестационарные связанные механодиффузионные процессы в ортотропном сплошном цилиндре с учетом релаксации диффузионных потоков // Известия высших учебных заведений. Математика. – 2022. – №1. – с.25-37.
- [5] Зверев Н.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Нестационарная механодиффузия сплошного ортотропного цилиндра, находящегося под действием равномерного давления, с учетом релаксации диффузионных потоков // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2021. – Т.27, №4. – с.570-586.

СВЯЗАННЫЕ МОДЕЛИ ВЗАИМНОЙ ДИФФУЗИИ И ВЯЗКОУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Дудин Д.С.¹, Келлер И.Э.²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
dmitryovj@yandex.ru, kie@icmm.ru

Связанные процессы механодиффузии сопровождают формирование поля отрицательных остаточных напряжений в ходе проникновения атомов азота в поверхностный слой материала путём ионно-плазменной имплантации, рост микродефектов в поверхностном слое металлических сплавов в агрессивной среде с последующим коррозионным растрескиванием и контролируют формирование мелкозернистой структуры металлических материалов при интенсивной пластической деформации.

Рассматриваются связанные системы уравнений равновесия и диффузии с учётом вязкоупругой реологии среды, которые записываются в различных характеристических системах отсчёта [1]. Для формулировки связанных моделей диффузионных и реологических процессов используется теория смешения, в которой вводятся тензор напряжений и деформаций для материала, а компоненты различаются через переменные состава. Связь диффузионных и механических процессов обеспечивается линейными феноменологическими уравнениями, удовлетворяющими второму закону термодинамики. Обсуждаются подходы к построению характеристических скоростей, которые позволяют вводить диффузионное движение материала вместе с движением, не зависящим от диффузии, и соответствующие диффузионные характеристики, идентифицируемые в ходе экспериментов на взаимную диффузию. Для характеристических систем отсчёта введена классификация в зависимости от вида характеристической скорости. Первая группа характеристических скоростей определяется суммой взвешенных диффузионных потоков и используется при обработке данных эксперимента Киркендалла [2]. Вторая группа задаётся через сумму взвешенных плотностей потоков веществ и используется для построения связанных моделей [1]. Последняя группа характеристических скоростей определяется плотностями потоков веществ и диффузионными потоками, которые в отличие от диффузионных потоков второй группы являются независимыми, и также используется для моделирования связанных процессов [3]. Внутри группы для описания процессов взаимной диффузии используются различные переменные состава. Показано, что коэффициенты диффузии, определённые в разных группах, зависят друг от друга, но связанные модели не являются математически эквивалентными. Формулируются системы связанных уравнений как с учётом, так и без учёта условия молекулярной несжимаемости.

Литература

- [1] Хаазе Р. Термодинамика необратимых процессов – Москва, 1967. – 541 с.
- [2] Paul A., Laurina T., Vuorinen V., Divinski S.V. Thermodynamics, Diffusion and the Kirkendall Effect in Solids – Heidelberg, 2014. – 530 p.
- [3] Brassart L., Liu Q., Suo Z. Mixing by Shear, Dilation, Swap, and Diffusion – J. Mech. Phys. Solids, 2018. – pp. 253-272.



ВЛИЯНИЕ АТОМОВ ВОДОРОДА НА НАПРЯЖЕНИЕ ТЕЧЕНИЯ В AL-CU СПЛАВЕ

Безбородова П.А., Красников В.С., Майер А.Е.

Челябинский государственный университет, Челябинск

ibragimova-polin@mail.ru

В настоящей работе проведено многомасштабное исследование роли водорода, накопленного на θ' фазах, на механические свойства Al-Cu сплава. На уровне атомистического моделирования впервые проведено исследование механизмов взаимодействия дислокации с упрочняющим включением в зависимости от содержащегося во включении водорода. Определены энергетически предпочтительные места расположения водорода вблизи упрочняющих включений θ' -фазы в Al-Cu сплаве. Система с максимальным содержанием водорода демонстрирует при комнатной температуре тенденцию к поглощению атомов водорода, изначально расположенных на межфазной границе. Показано, что накопление водорода в объеме θ' вызывает снижение сопротивляемости включения к сдвигу и вызывает смену механизма взаимодействия от формирования петли Орована к перерезанию включения. Этот результат получен в МД для двух рассмотренных размеров включения: 5 и 10 нм.

Взаимодействие дислокаций с включением исследовано с использованием программного пакета LAMMPS [1]. Взаимодействие атомов описывается BOB потенциалом [2]. Анализ и визуализация полученных атомных распределений осуществляется с помощью пакета OVITO [3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-71-10038.

[1] S.Plimpton, J. Comput. Phys. 117 (1995).

[2] X. Zhou, D. Ward, M. Foster. New J. Chem. 42, 5215-5228 (2018).

[3] A.Stukowski, Mater. Sci. Eng. 18, 015012 (2010).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ ЭД-20 И ТРИЭТИЛЕНТЕТРААМИНА В УСЛОВИЯХ ОТКРЫТОГО КОСМОСА С УЧЕТОМ ИСПАРЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ С НИЗКОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАССОЙ

Комар Л.А.¹, Кондюрин А.В.², Свистков А.Л.¹, Терпугов В.Н.³

¹ИМСС УрО РАН, Пермь

²Эвингар Сайентифик, Эвингар

³Пермский государственный университет, Пермь

komar@icmm.ru, alexey.kondyurin@gmail.com, svistkov@icmm.ru, terpugov@psu.ru

Полимерные материалы на основе эпоксидных смол, благодаря уникальности своих свойств, имеют широкое применение в космической промышленности. Они обладают необходимой прочностью и низким весом. Высокая радиационная стойкость позволяет использовать эти материалы для создания достаточно крупных космических объектов, например, антенн с радиусом отражающей части в несколько десятков метров. В настоящее время наибольший интерес разработчиков заключается в создании таких объектов, конструкционные элементы которых сделаны из препрегов. Они значительно легче по сравнению с металлическими и способны быть плотно упакованными для помещения в контейнер космического аппарата, который доставит этот объект на околоземную орбиту, где он в дальнейшем должен быть развернут и принять жесткую форму за счет отверждения конструкционных элементов из препрега. В процессе отверждения эти элементы подвергаются действию высокого вакуума и резким изменениям температуры от -150 до +150 градусов Цельсия, то есть, в условиях существенно отличающихся от земных. По этой причине актуальность изучения кинетики химической реакции полимеризации препрегов в условиях приближенных к условиям открытого космоса имеет высокое значение.

Предлагается математическая модель, которая специально разработана для изучения кинетики химической реакции полимеризации, протекающей в особо сложных условиях. Например, решение задачи в постановке без учета испарения позволяет получить полное представление о молекулярно-массовом распределении во времени всех групп реакции, как аминных так и эпоксидных. Время отверждения в этом случае определяется эквивалентным соотношением реагирующих эпоксидных и аминных групп и значениями коэффициентов скорости химической реакции, существенно зависящих от внешней температуры. При решении задачи с учетом испарения предполагалось, что на границе отверждаемого эпоксидного материала имеется тонкая пограничная пленка с особыми свойствами, через которую в открытый космос испаряются молекулы с низкой молекулярной массой. Процесс испарения определяется присутствием диффузионной составляющей в системе уравнений. Накладываемое при этом дополнительное граничное условие выводится из предположения о том, что испарение происходит в том случае, когда значение кинетической энергии молекулы с заданной молекулярной массой превысило величину работы, затрачиваемой этой молекулой на преодоление энергетического барьера. В математической формулировке это означает, что за некоторый малый момент времени и некоторую малую площадь поверхности испарится определенное количество молекул, зависящее не только от массы молекул и величины работы, затрачиваемой этими молекулами на преодоление энергетического барьера, но и от их плотности распределения на границе с пленкой.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта N C-26/1025.

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ КИНЕТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ КОНВЕРСИИ СВЯЗУЮЩЕГО КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Пестренин В.М.¹, Пестренина И.В.¹, Ландик Л.В.¹, Кондюрин А.В.²

¹Пермский государственный университет, Пермь

²Эвингар Сайентифик, Эвингар

pestreninvm@mail.ru, ipestrenina@gmail.com, lidialandik@gmail.com,
info@ewingarscientific.com.au

В задачах технологической механики изготовления конструкций из композитов, а также в задачах изготовления, упаковки и развертывания в космосе конструкций космического назначения возникает необходимость вычисления эффективных свойств композитного материала с не полностью отвержденным связующим. Оценка показывает, что значения некоторых эффективных термоупругих констант волокнистого композита в процессе отверждения связующего могут изменяться на порядок.

Для описания отверждения связующего в процессе его полимеризации применяются различные кинетические уравнения, обобщающие на рассматриваемый авторами состав связующего закон Арениуса. В частности, для связующих на основе эпоксидных смол многие авторы [1, 2 и др.] используют уравнение с автоускорением и автозамедлением

$$dC/dt = -k_1 * C * [1 + k_2 * (1 - C)] * [1 - k_3 * (1 - C)], \quad (1)$$

где $C = 1 - \beta$ – концентрация эпоксидных групп, β – степень отверждения связующего; экспериментально определяемые коэффициенты уравнения k_1, k_2, k_3 могут быть функциями температуры, k_1 подчиняется закону Арениуса. В работе предлагается алгоритм определения параметров уравнения (1) по изотермическим экспериментальным данным. Уравнение интегрируется и представляется в форме

$$F(C, T, t, k_1, k_2, k_3) = 0. \quad (2)$$

По экспериментальным данным при температуре T_i ($i = 1, \dots, m$), m – число изотермических опытов, строится система уравнений

$$F(C_{ij}, T_i, t_{ij}, k_{1i}, k_{2i}, k_{3i}) = 0, \quad (3)$$

где $j = 1, \dots, n_i$, n_i – число экспериментальных точек для T_i температуры. Система полученных уравнений решается приближенно.

Приводятся результаты построения кинетического уравнения для двух- и многокомпонентных связующих Барнес и Гурит. Использование кинетических уравнений демонстрируется на примерах определения степени отверждения связующих, подвергаемых заданному температурному нагружению.

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

Литература

- [1] Arinina, M.P., Kostenko, V.A., Gorbunova, I.Y., Il'in, S.O., Malkin, A.Y. Kinetics of Curing of Epoxy Oligomer by Diaminodiphenyl Sulfone: Rheology and Calorimetry //Polymer Science - Series A 2018 60(5), с. 683-690
- [2] Фоминых А.В., Аношкин А.Н., Лысенко С.Н. Экспериментальное исследование кинетики полимеризации эпоксидной смолы // Математическое моделирование систем и процессов. – 2000. – №8. – С. 94–98.

АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРЕПРЕГОВ ПОЛОТНЯНОГО СТРОЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕМЕНТОВ НАДУВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ОТВЕРЖДАЕМЫХ В КОСМОСЕ

Кондюрин А.В.¹, Пелевин А.Г.^{2,3}, Поморцева Т.Н.², Свистков А.Л.³, Терпугов В.Н.²

¹Компания Эвингар Сайентифик, Эвингар

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

³ИМСС УрО РАН, Пермь

alexey.kondyurin@gmail.com, pelevin.a@icmm.ru, tata.lisica@yandex.ru, svistkov@icmm.ru,
terpugov@psu.ru

Одним из перспективных направлений в ракетно-космической области является использование надувных конструкций. Они обладают рядом преимуществ: высокая степень упаковки в отсеке космического корабля при выводе на орбиту; отсутствие повреждающего действия перегрузок, которые действуют при выводе транспортного корабля на орбиту; существенно меньшая масса по сравнению с металлическими конструкциями аналогичного назначения (жилые модули на МКС, рефлекторы большого размера), высокая надежность при разворачивании на орбите. Эксперименты с надувными конструкциями проводились постоянно на протяжении всей истории освоения космоса. В настоящее время на МКС проходит испытание жилой надувной модуль BEAM, разработанный компанией Bigelow Aerospace. Разрабатываются проекты надувных отсеков космических кораблей для полетов на Луну, Марс (компания Sierra Nevada), строительства космических гостиниц на околоземной орбите (компания Bigelow Aerospace).

В данной работе обсуждается возможность использования новой технологии, связанной с приданием жесткости надувной конструкции после приведения ее в рабочее состояние путем отверждения оболочки конструкции в космосе. Предлагается использовать препрег горячего отверждения как один из элементов оболочки надувного блока. Из расчетов теплового состояния и замеров температуры поверхности тел на околоземной орбите известно, что под действием солнечного излучения они могут нагреваться до необходимых температур для горячего отверждения препрега. Реальные эксперименты с отверждением в космосе связаны с преодолением ряда технических проблем (защитой МКС от испаряющихся элементов реакционной смеси и т.д.) и они требуют больших финансовых затрат. Поэтому целесообразно получить предварительную информацию с помощью вычислительного моделирования.

В работе приводятся результаты вычислительного моделирования упругих свойств препрега с полотняным плетением в зависимости от степени отверждения эпоксидного связующего. Осуществлен анализ механического поведения элемента каркаса в каркасно-надувной конструкции на примере цилиндрической оболочки при разных нагружениях в зависимости от степени отверждения, давления воздуха внутри элемента каркаса и его геометрии.

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

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО НЕКОНТАКТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИНДУКЦИОННОГО ПОДВЕСА

Скубов Д.Ю.^{1,2}, Индейцев Д.А.², Удалов П.П.¹, Попов И.А.¹, Лукин А.В.¹, Полеткин К.В.³

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

²Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург

³Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe

skubov.dsk@yandex.ru, Dmitry.Indeitsev@gmail.com, pp_udalov@mail.ru, popov_ia@spbstu.ru,
lukin_av@spbstu.ru, k.poletkin@gmail.com

Электромагнитный бесконтактный подвес - прибор, работающий на принципе электромагнитной левитации [1,2]. В результате этого движущаяся часть подвеса является механически бесконтактной, что приводит к уменьшению износов узлов конструкции из-за отсутствия механического трения, потерь механической энергии и т.д. [3]. Электромагнитная левитация [4] микро- и нано- подвесов основывается на законе электромагнитной индукции [5]. При этом чувствительный элемент подвеса теряет механический контакт с неподвижной частью конструкции, приобретая при этом достаточно большую (теоретически бесконечную) чувствительность [6], что позволяет использовать данный прибор как сенсор, регистрирующий малейшие воздействия на чувствительный элемента в окрестности своего положения равновесия, что показано в работах [6,7]. Для демонстрации принципа работы прибора предположим, что подвес работает как датчик ускорений, то есть как акселерометр. С уменьшением жесткости подвеса чувствительность акселерометра, неограниченно увеличивается и в пределе становится бесконечной. Основной целью данной работы является развитие общего аналитического подхода к исследованию нелинейной динамики электромагнитных подвесов на основе рассмотренной задачи нахождения и анализа характера положения равновесия электромагнитного подвеса [6]. Проводится аналитическое исследование магнитной части электромагнитного подвеса и получение условий для нахождения положения равновесия и устойчивости колебаний левитирующего объекта вблизи его положения равновесия. Выполняется оценка магнитной жесткости магнитного подвеса.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 21-71-10009, <https://rscf.ru/project/21-71-10009/>

Литература

- [1] Post R.F., Ryutov D.D. The inductrack: A simpler approach to magnetic levitation //IEEE Transactions on applied superconductivity. – 2000. – Т. 10. – №. 1. – С. 901-904.
- [2] Kordyuk A.A. Magnetic levitation for hard superconductors //Journal of Applied Physics. – 1998. – Т. 83. – №. 1. – С. 610-612.
- [3] Крюков О.В. Газотранспортные агрегаты с электромагнитным подвесом ротора //Russian Internet Journal of Industrial Engineering. – 2016.
- [4] Han H.S., Kim D.S. Magnetic levitation //Springer Tracts on Transportation and Traffic. Springer Netherlands. – 2016. – Т. 247.
- [5] Maxwell J.C. Electricity and magnetism. – New York : Dover, 1954. – Т. 2.
- [6] Poletkin K.V., Chernomorsky A.I., Shearwood C. Proposal for micromachined accelerometer, based on a contactless suspension with zero spring constant //IEEE Sensors Journal. – 2012. – Т. 12. – №. 7. – С. 2407-2413.
- [7] Poletkin K.V. Static Pull-In Behavior of Hybrid Levitation Microactuators: Simulation, Modeling, and Experimental Study //IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2020. – Т. 26. – №. 2. – С. 753-764.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ SH-ВОЛН В ДВУХСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЕ ИЗ НЕОДНОРОДНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЕВ

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

¹Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону,

²Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

tbelen415@mail.ru, kalin@ssc-ras.ru

Предложен подход к моделированию динамических процессов в неоднородной двухслойной структуре с пьезоэлектрической и диэлектрической составляющими. При моделировании неоднородного пьезоэлектрического слоя предложено использование двухкомпонентной модели с функционально градиентным изменением свойств по толщине [1-4]. При выборе материалов включений уделялось внимание материалам с незначительным расхождением значений упругих модулей и существенным отличием пьезоэлектрических и диэлектрических свойств. Наличие неоднородности диэлектрического слоя моделирует взаимопроникновение пьезоэлектрика и диэлектрика в узкой переходной области у границы раздела. В рамках модели полагалось, что плотность, диэлектрические и упругие модули диэлектрического слоя непрерывно изменяются по толщине от соответствующих параметров пьезоэлектрического материала до параметров основного материала диэлектрика. На примере задачи о распространении sh-волн в неоднородной двухслойной пьезоэлектрической структуре PZT/SiO₂ исследованы особенности поведения фазовых скоростей ПАВ для широкого диапазона частот. Предполагалось, что распространение волн вызвано действием удаленного источника гармонических колебаний, рассмотрен установившийся режим колебаний, поверхности свободны от механических напряжений и закорочены (металлизированы). В рамках модели исследовано влияние характера неоднородности, размера зоны перехода материалов и области локализации неоднородности по толщине структуры на относительные фазовые скорости ПАВ. Установлены особенности поведения фазовых скоростей ПАВ при различном расположении неоднородности, проведено сравнение с дисперсионными свойствами структуры с однородными составляющими.

Работа выполнена в рамках реализации госзадания Южного научного центра РАН (номер госрегистрации 122020100343-4). Часть исследований выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и администрации Краснодарского края (проект 19-48-230042).

Литература

- [1] Belyankova T.I., Vorovich E.I., Kalinchuk V.V., Tukodova O.M. Peculiarities of surface acoustic waves, propagation in structures with functionallygraded piezoelectric materials, coating from different ceramics on the basis of PZT // Journal of Advanced Dielectrics, 2020. – Vol.10. – No.1, 2. – 2060017.
- [2] Belyankova T.I., Kalinchuk V.V. Shear horizontal waves in piezoelectric structures with a functionally graded coating // Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2021. – Vol.28. – No. 5. – P. 486–494.
- [3] Belyankova T.I., Vorovich E.I., Kalinchuk V.V., Tukodova O.M. Features of Rayleigh Waves Propagation in Structures with FGPM Coating Made of Various Materials // Springer Proceedings in Materials. Vol. 10. Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. I.A. Parinov, S.-H. Chang, Y.-H. Kim, N.-A. Noda (eds). Cham: Springer, 2021. – P. 245–259.
- [4] Belyankova T.I., Vorovich E.I., Kalinchuk V.V., Tukodova O.M. Specific features of SH-waves propagation in structures with prestressed inhomogeneous coating made of piezoceramics based on LiNbO₃ // Journal of Advanced Dielectrics. 2021. – Vol.11. – No. 4–5. – 2160007.

ПРИМЕРЫ ПРИЛОЖЕНИЯ ЗАДАЧ О СОБСТВЕННЫХ И ВЫНУЖДЕННЫХ УСТАНОВИВШИХСЯ КОЛЕБАНИЯХ ДЛЯ ПОИСКА ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Ошмарин Д.А.

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

oshmarin@icmm.ru, mvp@icmm.ru

В данной работе рассматриваются приложения задач о собственных и о вынужденных установившихся колебаниях для оценки диссипативных свойств smart-систем на основе пьезоэлементов и электрических элементов и выбора параметров элементов электрических цепей, обеспечивающих максимальное демпфирование колебаний. В качестве объектов исследования выбраны консольно-защемленная упругая пластина и тонкостенная оболочка в форме полуцилиндра, жестко защемленная по торцам и свободно опертая по образующим. В качестве вариантов внешних электрических цепей рассмотрены наиболее распространенные схемы: резистивная цепь, состоящая из одного резистивного элемента, и резонансная электрическая цепь, состоящая из последовательно или параллельно соединенных резистивного и индуктивного элементов.

Приведены результаты численных исследований, позволяющие сравнить показатели демпфирования при значениях параметров цепей, найденных на основе известных передаточных функций и на основе предлагаемых авторами алгоритмов решения задач о собственных и вынужденных установившихся колебаниях рассматриваемых smart-систем для варианта последовательной резонансной RL -цепи. Для сравнения выбрана передаточная функция, представленная в работе [1], так как она наиболее часто встречается в различных приложениях. Для пластинки и оболочки рассчитаны значения сопротивлений и индуктивностей основе передаточных функций, представленных в [1], а также на основе выполнения условия, при котором мнимая часть комплексной собственной частоты достигает максимальное значение и условия, при котором достигается минимум амплитуды при вынужденных установившихся колебаниях.

Полученные результаты показали, что параметры электрических цепей, найденные на основе решения задачи о собственных колебаниях, обеспечивают более высокие показатели демпфирования, чем параметры цепей, найденные на основе известных передаточных функций. Для рассмотренных примеров также получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) при четырех различных вариантах значений параметров последовательной RL -цепи. В первом варианте параметры найдены из условия минимума амплитуды при вынужденных установившихся колебаниях; во втором – из условия максимума мнимой части комплексной собственной частоты колебаний; в третьем варианте параметры определялись на основе передаточной функции, которая, по сравнению с другими, обеспечивает максимальное демпфирование при свободных колебаниях; в четвертом – на основе передаточной функции, обеспечивающей наилучшее демпфирование при вынужденных колебаниях. Показано, что известные передаточные функции обеспечивают достаточно близкие результаты, но, как правило, только на одной из резонансных частот.

Литература

[1] Hagood, N. W. Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks. / N. W. Hagood, A. von Flotow // Journal of Sound and Vibration. – 1991. – Vol.146. – No.2. – P.243–268.

ПАССИВНАЯ СИСТЕМА ДЕМПФИРОВАНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ, СОЕДИНЁННЫХ С ВНЕШНЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПЬЮ

Каменских А.О., Лекомцев С.В., Матвеев В.П., Судаков А.И.

Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь
kamenskikh.a@icmm.ru, lekomtsev@icmm.ru, mvp@icmm.ru, sudakov@icmm.ru

Тонкие пластины и оболочки часто являются важными элементами сложных деталей, которые функционируют в условиях высоких эксплуатационных нагрузок, вибраций или сейсмических воздействий. Риск возникновения резонансных явлений обосновывает не только необходимость мониторинга текущего состояния конструкции, но также требует и наличия системы управления протекающими динамическими процессами. Одним из способов демпфирования колебаний и вибраций является использование пьезоэлектрических элементов, к электродированным поверхностям которых подключены внешние электрические цепи, обладающие импедансом [1, 2]. Подбирая его величину должным образом, можно добиться существенного снижения амплитуды вынужденных резонансных колебаний, а также увеличения скорости затухания свободных колебаний на требуемой моде.

В данной работе представлены экспериментальные результаты, наглядно демонстрирующие эффективность пассивной системы демпфирования колебаний на разных примерах. При её изготовлении наряду с традиционной пьезокерамикой были использованы макроволоконные композиты (MFC). Их основой являются тонкие пьезокерамические волокна, герметично размещённые в многослойной структуре из связующего, электродов и полиимидного основания. Показана возможность функционирования MFC под водой в качестве актуатора и сенсора. Рассмотрены технические аспекты, касающиеся замещения катушки индуктивности её электрическим аналогом на основе операционных усилителей. Проанализированы достоинства и недостатки такого подхода. Продемонстрирована возможность подавления колебаний на разных частотах за счёт использования двух пьезоэлектрических элементов, каждый из которых зашунтирован своей RL -цепью [3].

Представленные результаты получены 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 (направление: пассивное демпфирование колебаний композитных конструкций в воздушной среде), а также в ходе выполнения работ по проекту Российского научного фонда №18-71-10054 (направление: пассивное демпфирование колебаний прямоугольных пластин, взаимодействующих с жидкостью).

Литература

- [1] Hagood N.W., von Flotow A. Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks // Journal of Sound and Vibration. – 1991. – V. 146, №2. – P. 243–268.
- [2] Fleming J.A., Moheimani S.O. Reza. Piezoelectric transducers for vibration control and damping, 1st ed. – London: Springer, 2006. – XVI, 271 p.
- [3] Iurllov M.A., Kamenskikh A.O., Lekomtsev S.V., Matveenko V.P. Passive suppression of resonance vibrations of a plate and parallel plates assembly, interacting with a fluid // International Journal of Structural Stability and Dynamics. – 2022. – V. 22, №9. – 2250101.

АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ И УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С ТЕКУЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ

Лекомцев С.В., Матвеев В.П., Сенин А.Н.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

lekomtsev@icmm.ru, mvp@icmm.ru, senin.a@icmm.ru

При пассивном подавлении резонансных колебаний или управлении границей гидроупругой устойчивости тонких пластин и оболочек в конструкцию добавляются пьезоэлементы, соединённые с внешней электрической цепью. Задача подбора оптимальных параметров таких цепей осуществляется на основе решения неклассической проблемы на собственные значения и является достаточно ресурсоёмкой. В случае неподвижной жидкости или её отсутствия возможно замещение исследуемой системы эквивалентным электрическим аналогом или применение технологии снижения размерности на основе разложения движения системы по формам собственных колебаний. Использование данных методик при взаимодействии конструкции с текущей жидкостью, в особенности при наличии сильно выраженного демпфирования (например, при флаттере), вызывает определённые трудности. В связи с этим в данной работе приводятся математическая постановка и эффективный конечно-элементный алгоритм её численной реализации, предназначенные для анализа собственных колебаний и устойчивости электромеханических систем, взаимодействующих с текущей жидкостью. Они базируются на моделях и компьютерных программах, разработанных и апробированных авторами ранее [1, 2]. В рассматриваемом подходе используются представление пьезоэлемента в рамках гипотезы плоского напряжённого состояния и допущение о равенстве нулю всех компонент векторов напряжённости электрического поля и электрической индукции, за исключением нормальных к поверхности конструкции [3]. Деформации тонкостенной конструкции определяются с помощью соотношений линейной теории тонких пластин и оболочек на основе гипотез Кирхгофа – Лява. Безвихревая динамика идеальной сжимаемой жидкости в случае малых возмущений описывается потенциалом возмущённых скоростей. Данная модель позволяет получить обобщённую задачу на собственные значения, решение которой осуществляется известными методами и требует значительно меньше вычислительных ресурсов в сравнении с неклассической модальной задачей. С помощью разработанного численного алгоритма подобраны оптимальные параметры соединённой с пьезоэлементом RL -цепи, которые, с точки зрения скорости затухания, обеспечивают максимальное демпфирование резонансных колебаний пластин и оболочек, взаимодействующих с текущей жидкостью. Получены амплитудно-частотные характеристики, демонстрирующие снижение амплитуды колебаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-71-10054).

Литература

- [1] Bochkarev S.A., Lekomtsev S.V., Matveenko V.P. Natural vibrations and stability of elliptical cylindrical shells containing fluid // International Journal of Structural Stability and Dynamics. – 2016. – V. 16, №10. – 1550076.
- [2] Bochkarev S.A., Lekomtsev S.V., Senin A.N. Analysis of spatial vibrations of piezoceramic eccentric cylindrical shells interacting with an annular fluid layer // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2019. – V. 13, №49. – P. 814–830.
- [3] Thomas O., Deü J.-F., Ducarne J. Vibrations of an elastic structure with shunted piezoelectric patches: efficient finite element formulation and electromechanical coupling coefficients // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2009. – V. 80. – P. 235–268.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДЕМПФИРУЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОЛОЧКИ

Ошмарин Д.А., Юрлова Н.А., Севодина Н.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

oshmarin@icmm.ru, yurlova@icmm.ru, natsev@icmm.ru

Данная работа посвящена оптимизации демпфирующих характеристик конструкции путем дополнения ее элементами, реализующими различные механизмы диссипации энергии колебаний. С этой целью рассматривается электро-вязкоупругая система, представляющая собой трехкомпонентное кусочно-однородное тело, состоящее из упругих, вязкоупругих и из электроупругих (пьезоэлектрических) элементов, к электродированным поверхностям которых присоединяются резистивные (R -) или резонансные (RL -) электрические цепи.

Целью исследования является установление характера зависимости динамических характеристик системы от параметров, определяющих ее геометрическую конфигурацию (размеры и расположение элементов, формирующих систему, по отношению друг к другу) и от параметров внешних электрических цепей. Оценивается влияние этих параметров на значения собственных частот колебаний, коэффициентов демпфирования, а также на значение коэффициента электромеханической связи, характеризующего количество механической энергии колебаний, преобразованной в электрическую, в дальнейшем рассеиваемую в шунтирующих пьезоэлемент электрических цепях. Исследование проводится численно, на основе решения задачи о собственных колебаниях на примере пространственной конструкции в виде полуцилиндрической оболочки, к поверхности которой присоединены вязкоупругий и/или шунтированный пьезоэлектрический элемент.

Рассмотрены все возможные варианты взаимного расположения составляющих электро-вязкоупругой системы, две схемы увеличения размеров вязкоупругого и пьезоэлектрического элементов, отличающихся начальным их расположением и различным положением при неполном покрытии поверхности оболочки. Расчеты проведены для двухкомпонентных (вязкоупругой и электроупругой) и трехкомпонентной (электро-вязкоупругой) систем.

Найдены варианты компоновки конструкции, которые могут обеспечить наилучшие демпфирующие свойства в некотором диапазоне частот за счет либо предпочтительной работы механизма внутреннего трения, либо преобразования энергии пьезоэлементом, или же за счет задействования обоих механизмов диссипации энергии. Продемонстрировано, в каких случаях использование и вязкоупругого, и шунтированного электрическими цепями пьезоэлектрического элементов оправданно для повышения диссипативных свойств рассматриваемой системы, а в каких – не целесообразно.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края (проект № 19-41-590007 p_a).

СВЯЗАННЫЕ ЗАДАЧИ МЕХАНОХИМИИ: ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЯ

Фрейдин А.Б.

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

alexander.freidin@gmail.com

Рассмотрены химические реакции в деформируемом теле между твердым и диффундирующим компонентами типа реакций окисления или литизации кремния. Реакция сопровождается собственной деформацией превращения и изменением реологических свойств материала, в случае упругих компонентов – изменением модулей упругости. Развит подход к описания химических реакций в деформируемом теле, основанный на концепции тензора химического сродства (см. обзорную статью [1] и приведенный в ней список литературы. Дается обзор постановок связанных краевых задач «диффузия – химия – механика».

Обсуждается распространение фронта реакции, контролируемого диффузией или скоростью реакции. Рассмотрены случаи, когда фронт реакции может распространяться без воздействия механических напряжений или только под воздействием механических напряжений. Эффективность развиваемого подхода продемонстрирована на примерах решения краевых задач (см., напр., [2-4]). Показано, что механические напряжения могут ускорять, замедлять, блокировать и запускать химические реакции.

Построены запретные зоны, образованные деформациями, при которых фронт реакция не может распространяться [5]. Это позволяют исследовать влияние на протекания реакции не только величины напряжений, но и вида напряженного состояния.

Развиты процедуры анализа устойчивости фронта реакции и исследована конкуренция глобальной кинетики фронта и кинетики роста возмущений [6]. Отмечается, что потеря устойчивости фронта может быть причиной разрушения.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00552-П).

Литература

- [1] Freidin A.B., Vilchevskaya E.N. Chemical affinity tensor in coupled problems of mechanochemistry. In: Altenbach H., Öchsner A. (eds) Encyclopedia of Continuum Mechanics. Berlin: Springer. 2019.
- [2] Freidin A.B., Vilchevskaya E.N., Korolev I.K. Stress-assist chemical reactions front propagation in deformable solids // International Journal of Engineering Science. 2014. Vol. 83. P. 57–75.
- [3] Poluektov, M., Freidin, A.B., Figiel, L. (2018) Modelling stress-affected chemical reactions in non-linear viscoelastic solids with application to lithiation reaction in spherical Si particles // International Journal of Engineering Science 2018. Vol. 128. P. 44-62.
- [4] Morozov A. et al. Experimental and theoretical studies of Cu-Sn intermetallic phase growth during high-temperature storage of eutectic snag interconnects // Journal of Electronic Materials, 2020. Vol. 49, No. 12. P. 7194-7210.
- [5] Freidin A. B., Sharipova L. L., Forbidden strains and stresses in mechanochemistry of chemical reaction fronts. In: Generalized Models and Non-classical Approaches in Complex Materials 1/ Ed. by Altenbach H. et al (Advanced Structured Materials. V. 89), Springer, Cham. 2018. P.335- 348.
- [6] Freidin A.B., Morozov A., Muller W.H. (2021) Propagation and stability of chemical reaction fronts in coupled problems of mechanochemistry // AIP Conference Proceeding. 2021. 2371:020002.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦ В УПРУГОМ ТЕЛЕ

Кабанова П.К., Фрейдин А.Б.

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

kabanovapk@mail.ru, alexander.freidin@gmail.com

Настоящая работа посвящена численному исследованию распространения области новой фазы в упругом теле при фазовом превращении мартенситного типа. Материал фаз принимается линейно-упругим. Фазовое превращение сопровождается собственной деформацией превращения, изменением модулей упругости и скачком химической энергии (свободной энергии фаз в ненапряженном состоянии). Задача сводится к нахождению положения межфазной границы, эволюция которой описывается кинетическим уравнением, связывающим скорость точек границы с конфигурационной силой, равной скачку нормальной компоненты тензора энергии-импульса Эшелби (см., напр., [1]).

Построена численная модель, основанная на использовании метода конечных элементов [2,3]. Полученное решение верифицировано рассмотрением задач, имеющих аналитические решения: задачи о распространении плоской межфазной границы при одноосном растяжении пластины и осесимметричной задачи о распространении межфазной границы в цилиндре при радиальном растяжении.

Исследовано влияние величины внешнего растяжения на эволюцию межфазной границы. Исследовано, как достигается равновесное положение межфазной границы, которому соответствует нулевая конфигурационная сила [4]. Исследовано также распространение межфазной границы, когда равновесного положения нет.

Исследована кинетика распространения межфазной границы в окрестности концентратора напряжений. Для случая концентратора в виде кругового отверстия исследовано влияние соотношения размеров отверстия и области новой фазы на эволюцию межфазной границы. Также показано, что при большом внешнем растяжении межфазная граница «забывает» о концентраторе напряжений и приходит к равновесному положению. Для случая концентратора в виде эллиптического отверстия исследовано влияние соотношения полуосей эллипса на распространение области новой фазы, индуцированное концентратором напряжений. При этом внешнее растяжение выбрано так, что в отсутствие концентратора напряжений фазовое превращение не происходит.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00552-П).

Литература

- [1] Gross D. Morphological equilibrium and kinetics of two-phase materials. In: Configurational mechanics of materials/ Ed. by Kienzler R., Maugin G.A. (CISM Courses and Lectures. No. 427. The International Centre for Mechanical Sciences.) Wien: Springer-Verlag. P. 221-272 (2001).
- [2] Freidin A., Morozov A., Müller W.H. Propagation and stability of chemical reaction fronts in coupled problems of mechanochemistry. AIP Conf. Proc. 2371, 020002-1–020002-8 (2021).
- [3] Morozov, A. Numerical and analytical studies of kinetics, equilibrium, and stability of the chemical reaction fronts in deformable solids. Doctoral Thesis, Technische Universität Berlin (2021).
- [4] Гринфельд М.А. Методы механики сплошных сред в теории фазовых превращений. М.: Наука. 312 с. (1990).

МНОГОУРОВНЕВАЯ РАСШИРЕННАЯ СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ КОАЛЕСЦЕНЦИИ СУБЗЕРЕН

Кондратьев Н.С., П.В. Трусов, Подседерцев А.Н., Балдин М.Н.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
kondratevns@gmail.com, tpv@matmod.pstu.ac.ru, stevenmoore@yandex.ru,
matvej1999@gmail.com

Актуальной проблемой является разработка технологических способов обработки и получения функциональных поликристаллических материалов с наперед заданными свойствами [1]. Физико-механические свойства материалов и эксплуатационные характеристики изделий из них определяются состоянием внутренней структуры материала. Интенсивная пластическая деформация приводит к существенным перестроениям материальной структуры на различных масштабных уровнях, в результате меняются макросвойства поликристаллов. Подходящим и эффективным инструментом исследования эволюции структуры является многоуровневый подход к описанию неупругого деформирования с внутренними переменными [1]. Высокотемпературное пластическое деформирование сопровождается рядом процессов, приводящих к значительной перестройке мезо- и микроструктуры. Наиболее существенным с точки зрения изменения свойств поликристалла являются эволюция зеренной и дефектной структуры, осуществляемой за счет динамической рекристаллизации [2]. На последовательность ее прохождения влияет динамический возврат. В работе рассматривается проблема слияния субзерен в результате их разворотов при неупругом горячем деформировании. Этот процесс носит название коалесценции субзерен и является частью динамического возврата, в результате которого происходит изменения тонкой субзеренной структуры [2]. При соответствующих термомеханических воздействиях процесс коалесценции способствует формированию зародышей рекристаллизации, которые способны видоизменять зеренную структуру поликристалла [2]. Для решения поставленной задачи применяется расширенная статистическая модель неупругого деформирования, в которой предлагается способ учета коалесценции субзерен. Модель модифицирована для учета между структурными элементами (субзернами) локальных контактных взаимодействий, без рассмотрения которых отсутствует возможность корректного описания коалесценции, осуществляемой в результате понижения энергии субзеренных границ при их слиянии. Для этого формируется приближенная к реальной субзеренная структура с применением полиэдров Лагерра. Применяется оригинальная модель разворотов субзерен, основанной на выделении краевой составляющей избыточной плотности дислокаций одного знака на субзеренных границах. Приводятся результаты моделирования для поликристалла меди, показано влияние температуры, скорости деформирования на коалесценцию субзерен.

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-2021-0012).

Литература

- [1] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения, 2019. – 605 с.
- [2] Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов, 2005. – 433 с.

ВАРИАЦИОННЫЙ ПРИНЦИП, ПОЗВОЛЯЮЩИЙ МОДЕЛИРОВАТЬ КРИВЫЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Головина Н.Я.¹, Белов П.А.²

¹Тюменский индустриальный университет, Тюмень

²Институт прикладной механики РАН, Москва

golovinanj@tyuiu.ru, belovpa@yandex.ru

Работа посвящена теоретическому построению кривой деформирования для упругопластических материалов. Для этого сформулирован новый вариационный принцип [1,2], требующий стационарности неинтегрируемой линейной вариационной формы. В общем случае эта вариационная форма может быть представлена в виде суммы вариации функционала и простейших вариационных неинтегрируемых форм, которые будем называть каналами диссипации. Каждому слагаемому в этом вариационном принципе приписывается физический смысл включения/выключения какого-то механизма деформирования. Наиболее простой функционал $\int \sigma^{*'} \sigma^{*'} d\varepsilon^*$ дает в качестве своей экстремали линейный закон Гука. Здесь ε^* и σ^* - нормированные координаты точек кривой деформирования. Напряжение нормировано на предел прочности, а деформация на предельную деформацию. Данная нормировка приводит к тому, что все кривые деформирования начинаются в точке (0;0), а заканчиваются в точке (1;1). Простейшая вариационная неинтегрируемая форма $\int \varepsilon(\sigma^{*''} \delta \sigma^{*'} - \sigma^{*'} \delta \sigma^{*''}) d\varepsilon^*$ в совокупности с $\int \sigma^{*'} \sigma^{*'} d\varepsilon^*$ дает в качестве своей экстремали закон Рамберга-Осгуда [3]. Таким образом можно моделировать различные кривые, комбинируя на определенных участках различные механизмы деформирования. Такой феноменологический подход позволяет обойти трудности, которые возникают при детализации этих механизмов с помощью мезомеханики или наномеханики. Становится возможным трактовать характерные точки кривой деформирования, как точки, при переходе через которые включается/выключается тот или иной механизм деформирования. В частности, предел пропорциональности можно трактовать, как точку, при переходе через которую процесс деформирования перестает быть линейным. При этом соответствующая вариационная форма может быть представлена в виде вариации функционала:

$$\frac{1}{2} \int [A_{22} \varepsilon^{*2} \sigma^{*''} \sigma^{*''} + 2A_{21} \varepsilon^* \sigma^{*''} \sigma^{*'} + A_{11} \sigma^{*'} \sigma^{*'}] d\varepsilon^*$$

Этот функционал имеет три слагаемых, что соответствует одновременному действию трех механизмов деформирования. Этот функционал описывает обратимые процессы. Чтобы учесть диссипативные процессы, необходимо ввести еще один процесс деформирования в виде простейшей неинтегрируемой вариационной формы:

$$\int B_{12} \varepsilon(\sigma^{*''} \delta \sigma^{*'} - \sigma^{*'} \delta \sigma^{*''}) d\varepsilon^*$$

Число допустимых каналов диссипации определяется числом билинейных слагаемых, присутствующих в функционале. В данном случае это единственный канал диссипации. Сформулированная теория позволила с высокой точностью построить теоретические кривые деформирования.

Литература

- [1] Головина Н.Я., Белов П.А. Кривая деформирования как экстремаль некоторого функционала / Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 10 (100). С. 44-52
- [2] Головина Н.Я., Белов П.А. Модель кривой нелинейного деформирования стали 20ХГР и стали 35 / Проблемы прочности и пластичности. 2020. Т. 82. № 3. С. 305-316.
- [3] Головина Н.Я. Об одной эмпирической модели нелинейного деформирования упругопластических материалов / Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2020. Т. 17. № 3. С. 48-55.

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИНГУЛЯРНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ТОЧКИ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ФРОНТОВ ТРЁХМЕРНЫХ ТРЕЩИН

Фёдоров А.Ю., Матвеев В.П., Галкина Е.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

fedorov@icmm.ru, mvp@icmm.ru, galkina.e@icmm.ru

В задачах теории упругости существуют сингулярные решения, обусловленные наличием бесконечных значений напряжений в отдельных точках (линиях) области, называемых особыми. Большой интерес ввиду практического значения представляют особые точки, определяющие вершины пересечения фронтов пространственных трещин. Обзор опубликованной литературы показал, что результатов о сингулярности напряжений для точек пересечения фронтов трёхмерных трещин, представлено мало. Авторы работы [1] исследовали сингулярность напряжений в вершине клиновидной трещины с различными условиями на берегах и в общей вершине пересечения двух клиновидных трещин. В работе [2] представлены результаты для вершины клиновидной трещины с углом раствора 90 градусов в изотропном и анизотропном материалах; в работах [2, 3] исследована общая вершина трёх различных материалов на поверхности составного полупространства. В данной работе исследовано асимптотическое поведение напряжений в окрестности точки пересечения фронтов трёхмерных трещин в изотропном материале, фронты которых перпендикулярны поверхности упругого полупространства. Рассмотрены задачи о пересечении двух, трёх и четырёх трещин. Для численных расчётов использовался метод конечных элементов, реализованный в пакете инженерных расчетов ANSYS. Достоверность численных результатов обеспечивалась использованием конечно-элементных сеток, сгущающихся к точке пересечения фронтов трёхмерных трещин, и выбором на основе численных экспериментов степени дискретизации, обеспечивающей необходимую точность решения. В качестве таких дискретизаций использовались конечно-элементные сетки, которые обеспечивали при двукратном уменьшении размеров конечных элементов изменение вычисленных значений перемещений не более чем на два процента. Сравнительный анализ проведён на основе значений средней плотности энергии деформаций, вычисленных для сферы фиксированного размера, центр которой находится в общей вершине фронтов трещин. Установлено, что для трёх и четырёх трещин наибольший уровень средней плотности энергии деформаций достигается для конфигураций, у которых все углы между трещинами относительно их общей вершины равны. Полученные результаты качественно соответствуют реальным картинам поверхностных трещин.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Пермского края (проект № 20-41-596007).

Литература

- [1] Korepanova T.O., Matveenko V.P., Sevodina N.V. Numerical analysis of stress singularity at singular points of three-dimensional elastic bodies // Acta Mech. — 2013. — Vol. 224, No. 9. — P. 2045–2063.
- [2] Pageau S.S., Biggers S.B. Finite element evaluation of free-edge singular stress fields in anisotropic materials // Int. J. Numer. Methods Eng. — 1995. — Vol. 38, No. 13. — P. 2225–2239.
- [3] Pageau S.S., Biggers S.B. Finite element analysis of anisotropic materials with singular inplane stress fields // Int. J. Solids Struct. — 1995. — Vol. 32, No. 5. — P. 571–591.

О РЕКОНСТРУКЦИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В НЕОДНОРОДНОМ ЦИЛИНДРЕ

Недин Р.Д.^{1,2}, Юров В.О.^{1,2}

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

²Южный математический институт ВНЦ РАН, Владикавказ

rdn90@bk.ru, vyurov@sfedu.ru

Предварительные напряжения (ПН) возникают в механических конструкциях в результате таких технологических процессов как прокат, сварка, термообработка и т.п. Задачи механики об изучении деформирования упругого тела с учетом ПН возникают также и при действии на объект исследования скрытой от наблюдателя нагрузки. Учет ПН важен при проектировании конструкций ответственного назначения с низким коэффициентом запаса прочности. Задача по анализу и выявлению ПН представляет особый интерес, поскольку ПН могут стать причиной преждевременного выхода из строя многих элементов конструкции.

В настоящем исследовании для конечного полого упругого цилиндра на основе общей слабой постановки в цилиндрических координатах сформулирована задача об осесимметричных установившихся колебаниях. Для учета ПН используется линейаризованная модель, построенная с помощью принципа наложения малых деформаций на конечные. В общей постановке задачи учитываются все шесть компонент тензора ПН. Модули упругости, плотность и компоненты тензора ПН задаются как функции радиальной и осевой координаты. При моделировании ПН осуществлено численное и полуаналитическое решение ряда вспомогательных задач. ПН условно разделены на типы в зависимости от вида внешнего механического воздействия (включая случаи предварительного раздувания внутренним давлением, растяжения, кручения, сдвига). Проанализировано влияние типа ПН на компоненты поля малых наложенных перемещений как в статике, так и в динамике (при этом рассмотрены спектры частот колебаний до третьего резонанса). Проведен анализ чувствительности ПН к типам зондирующего нагружения для более эффективного последующего решения обратных задач; проведены вычислительные эксперименты для различных случаев граничных условий, включая случай защемленного одним торцом цилиндра, выявлены зоны и условия наибольшей чувствительности.

Рассмотрена обратная задача по определению законов изменения ПН в постановке, когда дана информация об измеренном поле перемещений в наборе точек во всей области тела. На основе слабой постановки и проекционного метода предложена методика решения обратной задачи, которая позволяет определить тип и интенсивность действующего начального напряженного состояния по информации о поле перемещений. При отсутствии зашумления входной информации наблюдается достаточно высокая точность решения обратной задачи.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-71-10045, <https://rscf.ru/project/18-71-10045/>

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕРМОУПРУГОДИФФУЗИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ БАЛКИ БЕРНУЛЛИ-ЭЙЛЕРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ НАГРУЗКИ

Земсков А.В.^{1,2}, Ле Ван Хао¹

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва*

²*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
azemskov1975@mail.ru, vanhaovtl@gmail.com*

Эффекты, обусловленные взаимодействием полей различной физической природы, проявляющиеся в виде механоdiffузии, термомеханоdiffузии и т.д. достаточно часто проявляются в процессе эксплуатации технических систем и могут вызывать нежелательное воздействие на напряженно-деформированное состояние конструкций и их отдельных элементов. Поэтому построение математических моделей, способных адекватно описывать указанные явления в различных механических системах является на сегодняшний день очень важной задачей, как в научном плане, так и с практической точки зрения.

Различные модели и методы решения задач термомеханоdiffузии в последние десятилетия рассматривались в работах как отечественных, так и зарубежных авторов, что говорит об актуальности исследований в данной области [1,2].

В работе рассматривается задача о нестационарных колебаниях шарнирно опертой балки Бернулли-Эйлера, находящейся под действием распределенной нагрузки, с учетом релаксации температурных и диффузионных процессов. Исходная математическая модель включает в себя систему уравнений нестационарных изгибных колебаний балки с учетом тепломассопереноса, которая получена из общей модели термомеханоdiffузии для сплошных сред с помощью вариационного принципа Даламбера [3,4].

Решения задачи ищется в интегральной форме. Ядрами интегральных представлений являются функции Грина, для нахождения которых используются разложения в тригонометрические ряды Фурье и преобразование Лапласа по времени.

На примере свободно опертой трехкомпонентной балки выполненной из сплава цинка, меди и алюминия, находящейся под действием нестационарной, распределенной поперечной нагрузки, исследовано взаимодействие механического, температурного и диффузионного полей.

Литература

- [1] Парфенова Е.С., Князева А.Г. Влияние параметров химической реакции на взаимодействие тепловых, диффузионных и механических волн в условиях обработки поверхности потоком частиц // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14, № 1. – С. 77-90.
- [2] Kumar R., Ahuja S., Garg S. K. Rayleigh waves in isotropic microstretch thermoelastic diffusion solid half space // Latin American Journal of Solids and Structures. – 2014. – Vol. 11. – P. 299 – 319
- [3] Земсков А.В., Ле Ван Хао. Модель нестационарного изгиба балки Бернулли-Эйлера с учетом тепломассопереноса // В книге «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред». Сборник трудов 11-й Всероссийской научной конференции с международным участием. Москва, 23 – 25 ноября 2021 г. – М.: ООО «Сам Полиграфист», 2021. – С. 280-289.
- [4] Земсков А.В., Тарлаковский Д.В., Файкин Г.М. Нестационарный изгиб консольно-закрепленной балки Бернулли-Эйлера с учетом диффузии // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14, № 1. – С. 40-50

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ТРУБОБЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ МАЛОГАБАРИТНЫХ СЕЧЕНИЙ

Хазов П.А.¹, Ерофеев В.И.²

¹Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Н.Новгород

²Институт проблем машиностроения РАН, филиал ИПФ РАН, Н.Новгород
khazov.nngasu@mail.ru

Приводятся результаты экспериментальных исследований трубобетонных образцов малогабаритных сечений, при изготовлении которых применена сталь марки 09Г2С и бетон марки В12,5 со значением временной прочности 11 МПа. Исследовано поведение образцов трех типоразмеров. Обнаружена зависимость, приводящая к разработке инженерной методики построения диаграммы деформирования трубобетонных образцов. Для анализа влияния гибкого армирования изготовлены образцы диаметром 76 мм с применением арматуры класса А500. В результате потери устойчивости определены критические силы. Приведены результаты второстепенных испытаний стальной трубы, бетона и арматуры, входящих в состав композитного трубобетонного сечения. Выполнена оценка расчетной длины при условиях опирания «заделка-шарнир» для частично податливой заделки. Оценены значения коэффициентов продольного изгиба, что может быть использовано при создании единой методики расчета центрально сжатых трубобетонных конструкций. Расчетные длины соответствуют ожидаемым, определенным с помощью коэффициента расчетной длины (для шарнирно закрепленного с обоих концов – $\mu = 1$, для закрепления «заделка – шарнир» – $\mu \approx 0,7$). Коэффициенты продольного изгиба при совместной работе железобетона и стальной трубы имеют значения меньшие, чем у полый трубы, что происходит за счет высокой прочности короткого трубобетонного образца. Значительное увеличение (на 40-70%) несущей способности конструкций при заполнении трубы бетоном может оказаться экономически выгодным ввиду низкой стоимости бетона (в сравнении со сталью) при дальнейшей минимизации трудозатрат при изготовлении конструкций.

Литература

- [1] Кришан А. Л. Новое конструктивное решение трубобетонных колонн // III тысячелетие – новый мир: Труды международного форума по проблемам науки, техники и образования. – 2006. – Т. 2. – с. 81-84/
- [2] Овчинников И.И. Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 1. Опыт применения трубобетона с металлической оболочкой. «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №4 (2015)
- [3] Лапшин, А.А., Хазов П.А., Кожанов Д.А., Лихачева С.Ю.. Оценка прочности и устойчивости композитных сталежелезобетонных элементов с совместным применением стержневых и твердотельных расчетных моделей // Приволжский научный журнал /Нижегор. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Нижний Новгород, 2021. – № 3. – С. 9-16.
- [4] Канищев Р.А. Анализ местной устойчивости трубобетонных конструкций прямоугольного сечения // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 4(64). С. 59–68.
- [5] Morino S., Tsuba K. Design and Construction of Concrete-Filled Steel Tube Column System in Japan // Earthquake and Engineering Seismology. 2005. No. 1. Vol. 4. Pp. 51-73.
- [6] Тамразян А.Г., Манаенков И.К. испытание трубобетонных образцов малого диаметра с высоким коэффициентом армирования. Строительство и реконструкция. 2017;(4):57-62.
- [7] Хазов, П.А., Ерофеев В.И., Лобов Д.М., Ситникова А.К. Экспериментальное исследование прочности композитных трубобетонных образцов малогабаритных сечений. /Приволжский научный журнал /Нижегор. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Нижний Новгород, 2021. – № 3. – в печати.

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ УГЛЕПЛАСТИКОВ В УСЛОВИЯХ РАЗГРУЗОК И ВИБРАЦИЙ ПРИ СДВИГЕ

Вильдеман В.Э., Мугатаров А.И., Лунегова Е.М., Староверов О.А., Струнгарь Е.М.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
wildemann@pstu.ru, cem_mugatarov@mail.ru, cem.zubova@mail.ru, cem_staroverov@mail.ru,
cem.spaskova@mail.ru

В работе представлены результаты экспериментального исследования закономерностей механического поведения, в частности стабилизации процесса закритического деформирования, полимерного композита при сдвиге в плоскости армирования с разгрузками и дополнительными вибрациями. Объектом изучения являлись образцы углепластика с ориентацией армирующих слоев $[\pm 45]_{14}$. Испытания на сдвиг в плоскости армирования проводились методом испытания на растяжение в соответствии с рекомендациями стандарта ASTM D3518. Поля перемещений и деформаций были получены с применением видеосистемы Vic-3D. Процессы накопления повреждений и разрушения анализировались с использованием системы регистрации сигналов акустической эмиссии Amsy-6. Кинематическое нагружение проводилось по следующим режимам: активное нагружение до разрушения, нагружение с разгрузками в областях закритического деформирования, нагружение с дополнительными крутильными вибрациями на закритической стадии деформирования. Построены полные диаграммы нагружения, отмечено наличие протяженной стадии закритического деформирования, стадийность процессов накопления повреждений. Выявлено образование локализованной зоны при разупрочнении. Анализ сигналов акустической эмиссии демонстрировал наличие трех характерных диапазонов частот, наибольший энергетический вклад вносит диапазон низких частот, связанный с растрескиванием матрицы. При разгрузках для ряда образцов наблюдалась S-образная диаграмма нагружения [1,2]. Отмечено влияние на устойчивость процесса разупрочнения жесткости нагружающей системы в виде упругих частей образца [3]. Показано, что дополнительные вибрационные воздействия приводят к увеличению протяженности участка закритического деформирования. Сделан вывод о рациональности проведения экспериментальных исследований закритического деформирования композитов при сдвиге в плоскости армирования в связи с выявлением дополнительных прочностных и деформационных резервов, в также целесообразности учета жесткости нагружающих систем в расчетах конструкций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №22-19-00765) в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

Литература

- [1] Вильдеман В.Э. Закономерности и модели процессов накопления повреждений, закритического деформирования и структурных разрушений композиционных материалов. Вестник Пермского государственного технического университета. Динамика и прочность машин. – 2001. № 2. – с. 37 – 45.
- [2] Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / Под ред. Ю.В. Соколкина. — М.: Наука, Физматлит, 1997. – 288 с.
- [3] Вильдеман В.Э., Ломакин Е.В., Третьяков М.П., Третьякова Т.В., Лобанов Д.С. Экспериментальные исследования закритического деформирования и разрушения конструкционных материалов. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2018. – 156 с.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ ПРИ СЛОЖНЫХ РЕЖИМАХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Струнгарь Е.М., Лобанов Д.С.

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Центр экспериментальной механики, Пермь

sem.spaskova@mail.ru, sem.lobanov@gmail.com

Сложные механизмы повреждения и разрушения, присутствующие на этапе нагружения в композитах, увеличиваются по мере нагружения и в случае наличия концентрации напряжения. В настоящее время всё чаще применяются композиционные материалы в конструкциях элементов авиационных двигателей, работающих в условиях сложного температурного воздействия. В работе представлены результаты экспериментальных исследований по оценке работоспособности бесконтактной оптической видеосистемы Vis-3D [1-5] при испытаниях на растяжение в условиях нормальной и повышенных температур. Проанализированы зависимости регистрируемых значений деформации двумя независимыми методами измерений: метод корреляции цифровых изображений (КЦИ) и навесной экстензометр (Instron 2620-601 с измерительной базой 50 мм и максимально возможным отклонением от измеряемой величины 0,15%). Установлено, что разброс регистрируемых значений деформаций двумя независимыми методами измерений не превышает 2 %. Испытания проводились в Центре экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5882, в состав которой входит термокамера с рабочим диапазоном температур от -100 до $+350$ °С. Через окно в термокамере становится возможным реализовать съемку видеосистемой всей поверхности испытуемого образца. Исследовались образцы композиционного материала, изготовленного из стеклотекстолита СТЭФ и углепластика. Испытания на растяжение проводились при температурах 22, 100, 120, 200 и 300 °С. Предложены рекомендации по проведению температурных испытаний с использованием метода корреляции цифровых изображений. По результатам испытаний построены диаграммы деформирования. Получены поля и эпюры продольных деформаций при разных температурах. Проведена оценка мелкодисперсного покрытия, необходимого для реализации метода КЦИ, при температурных испытаниях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00113, <https://rscf.ru/project/22-79-00113/>)

Литература

- [1] Strungar E. M., Lobanov D.S. Mathematical data processing according to digital image correlation method for polymer composites, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 54 (2020), 56-65. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.54.04
- [2] Strungar E.M., Wildemann V.E., Lobanov D.S. Application of the digital image correlation method for the solution of fiber optical technologies problems // 2020. - AIP Conference Proceedings. 28TH Russian conference on mathematical modelling in natural sciences. 2216, 080006 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0003551>
- [3] Tretyakova T.V., Dushko A.N., Strungar E.M., Zubova E.M., Lobanov D.S. Comprehensive analysis of mechanical behavior and fracture processes of specimens of three-dimensional reinforced carbon fiber in tensile tests. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 1, pp. 173-183. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.15
- [4] Strungar, E., Lobanov, D., Wildemann, V. Evaluation of the Sensitivity of Various Reinforcement Patterns for Structural Carbon Fibers to Open Holes during Tensile Tests. *Polymers* 2021, 13, 4287. <https://doi.org/10.3390/polym13244287>
- [5] Strungar, E.M., Lobanov, D.S. Influence of structural features of spatially reinforced and laminated fiber carbon plastics on the nature of deformation and fracture // *Procedia Structural Integrity* 40 (2022) 258–263

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАПЛАВЛЕННЫХ ШВОВ И ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ СОЗДАННЫХ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Бахматов П.В.¹, Старцев Е.А.¹

¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре
mim@knastu.ru, egorstarts@inbox.ru

Несмотря на то, что все сварочные флюсы, и технологии их получения, для автоматической сварки и наплавки изобретены с 40-х по 90-е годы, в настоящее время активно ведется поиск новых решений и технологий в данной отрасли. Связано это с истощением минеральных ресурсов и ухудшением экологической обстановки в стране. Повышение стоимости переработки руд с ценными компонентами, ухудшение их качества, значительный рост капитальных затрат и эксплуатационных расходов на добычу, дробление и извлечение, высокие транспортные расходы. В мировой практике производство высококачественных сварочных материалов основывается на использовании дорогостоящих технически чистых оксидов и фторидов с введением дополнительных легирующих элементов в состав флюса, что существенно увеличивает себестоимость сварочных материалов. Все выше перечисленное вынуждает предприятия искать более дешевые источники сырья.

На территории стран СНГ накоплено 580 млн. т шлаков металлургических производств [1], которые подлежат переработке по существующим технологиям. Основная часть этих шлаков не используется, и хранится в отвалах. Металлургические шлаки в своем составе имеют множество компонентов, благодаря которым они могут являться одним из источников сырья для получения, новых сварочных материалов.

В работах [2-3] приведены результаты опыта по автоматической сварке, где в качестве сварочного флюса используется переработанные техногенные отходы. Исследованы химические и физические свойства полученных сварных швов. Установлено, что разработанный сварочный флюс обеспечивает оптимальную защиту сварочной ванны.

В работе [4] приведены результаты по наплавке порошковой проволокой созданной с применением переработанных техногенных отходов. В результате проведенной работы была апробирована сварочная порошковая проволока с экспериментальными наполнителями, проанализирована микроструктура полученных наплавочных покрытий, а так же их химический состав.

Литература

- [1] Каплан А.В., Давыдова Т.В., Грибков О.А. Обеспечение экономической эффективности рекультивации шлаковых отвалов металлургических комбинатов // Металлург. – 2011 – №6.
- [2] Bakhmatov P.V., Startsev E.A., Sobolev B.M. IMPACT AND EFFECT STUDY OF SUBMERGED-ARC WELDING CONDITIONS ON STRUCTURAL CHANGES IN WELD METAL Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Т. 200. С. 65-76.
- [3] Лапашинов А.А., Бахматов П.В., Старцев Е.А. ВЛИЯНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СВАРОЧНОГО ФЛЮСА НА ПОВЕРХНОСТЬ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ В сборнике: Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. Материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 4-х частях. 2021. С. 95-97.
- [4] Михайлов К.А., Клешина О.Н., Бахматов П.В., Старцев Е.А. Особенности применения сварочной порошковой проволоки с экспериментальными наполнителями при послойной наплавке В сборнике: МОЛОДЕЖЬ И НАУКА: АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. Комсомольск-на-Амуре, 2022. С. 67-69.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ И СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 316 LSI

Ильиных А.В., Струнгарь Е.М., Паньков А.М., Трушников Д.Н., Пермяков Г.Л.

ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь

ilinih@yandex.ru

В настоящее время огромное распространение получают аддитивные технологии, имеющие ряд преимуществ перед традиционными процессами изготовления. Одним из видов таких технологий является плазменная наплавка металлической проволокой. Она позволяет создавать изделия с достаточно большими размерами и сложной геометрической формой, что является трудоемким процессом при литье или фрезеровке. Представляет интерес изучение вопросов реализации механических свойств образцов и стержневых конструкций из анизотропных материалов, полученных методом плазменной наплавки.

Проведена серия экспериментальных исследований на растяжение, кручение и сдвиг образцов из нержавеющей стали 316 LSi, вырезанных в вертикальном и горизонтальном направлениях по отношению к плоскости наплавки. Для сопоставления полученных результатов с механическими свойствами, реализуемыми в простых стержневых конструкциях, дополнительно проведена серия испытаний на 4-х стержневых образцах сложной геометрии, также вырезанных в двух разных направлениях (см. рис. 1).

Испытания проводились в Центре коллективного пользования ЦЭМ ПНИПУ с использованием бесконтактной оптической видеосистемы Vic-3D и метода корреляции цифровых изображений (КЦИ). Испытания проводились с использованием камер Prosilica 50 мм (разрешающая способность 4872 x 3248 16 Мп). Скорость перемещения траверсы 2 мм/мин. Скорость съемки составила 5 кадров в секунду.

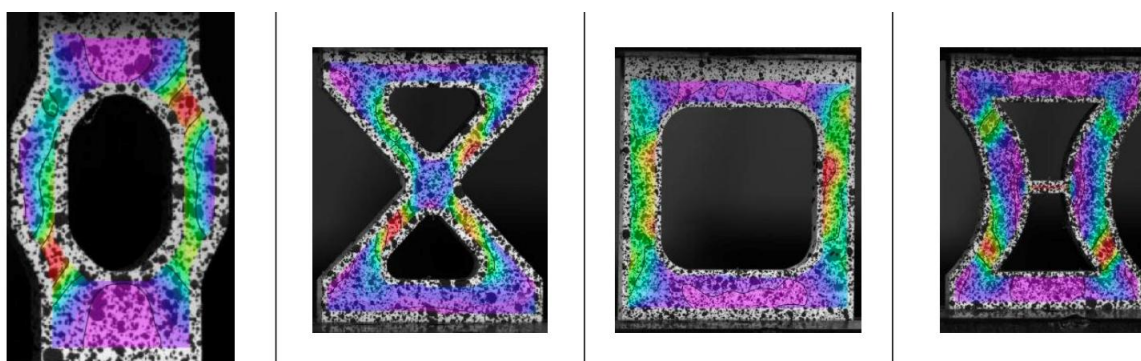


Рис. 1. Поля деформаций на поверхности стержневых конструкций при растяжении, полученных с использованием видеосистемы анализа Vic-3D

По результатам испытаний отмечено, что наибольшая анизотропия свойств проявляется для упругих характеристик аддитивной нержавеющей стали 316 LSi

Экспериментальные исследования выполнены за счет средств гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 20-48-596007-р_НОЦ_Пермский край

ОПИСАНИЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИИ МЕДИ С ПОМОЩЬЮ ДВУХУРОВНЕВОЙ КОНСТИТУТИВНОЙ МОДЕЛИ

Романов К.А., Швейкин А.И., Трусов П.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

k.a.kriv@mail.ru, shveykin@pstu.ru, tpv@matmod.pstu.ac.ru

Применение многоуровневого подхода, основанного на физических теориях пластичности (ФТП) [1], к построению конститутивных моделей (КМ) металлов и сплавов является эффективным способом для исследования и совершенствования процессов термомеханической обработки материалов, поскольку в моделях данного класса описывается изменение физико-механических свойств получаемого изделия за счет явного учета эволюции микроструктуры материала и механизмов деформирования на различных масштабных уровнях. Это обуславливает необходимость применения именно таких КМ для создания технологических процессов формования изделий с оптимальными для эксплуатации свойствами (функциональных материалов-конструкций) [1].

Актуальным для развития методов получения изделий из металлов и сплавов с улучшенными свойствами является исследование процесса измельчения зеренной структуры при интенсивных пластических деформациях, так как при уменьшении размера зерна, согласно закону Холла-Петча, повышается предел текучести, а при размере зерна ниже некоторого порогового значения увеличивается предел прочности.

В работе использована двухуровневая статистическая КМ для описания неупругого деформирования ГЦК-поликристалла [1], учитывающая внутризеренное дислокационное скольжение и ротации решеток кристаллитов. В рассматриваемую КМ ФТП интегрирована физическая модель ETMB (Y. Estrin, L.S. Toth, A. Molinari, Y. Brechet) [2, 3] для описания эволюции среднего размера ячейки при деформировании, в которую внесены модификации некоторых соотношений модели ETMB для более детального описания процесса измельчения.

Расширенная двухуровневая статистическая КМ с подмоделью ETMB применена для описания измельчения зеренной структуры при равноканальном угловым прессовании (РКУП) меди при комнатной температуре, в частности, было проведено детальное исследование эффектов, возникающих при нагружениях с изломом траектории деформации (из-за поворота образца между проходами). Полученные результаты численных экспериментов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

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-2021-0012).

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] Estrin Y., Toth L.S., Molinari A., Brechet Y. A dislocation-based model for all hardening stages in large strain deformation // Acta Mater. – 1998. – Vol. 46, № 15. – Pp. 5509–5522.
- [3] Toth L.S., Molinari A., Estrin Y. Strain hardening at large strains as predicted by dislocation based polycrystal plasticity model // J. Eng. Mater. Tech. – 2002. – Vol. 124. – Pp. 71–77.

Научное издание

**Механика деформируемого твердого тела в проектировании конструкций,
Пермь, 10 – 12 октября 2022 г.**

Программа и тезисы докладов

Издается в авторской редакции
Техническая подготовка и обработка материалов
Н.А. Юрлова

Подписано к использованию 28.09.2022

«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