

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский авиационный институт»
Национальный исследовательский университет

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Научный совет РАН по комплексной проблеме «Механика»

Научный совет РАН по механике деформируемого твердого тела

МЕЖДУНАРОДНАЯ МОЛОДЁЖНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«XLIV ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ»

17-20 апреля 2018

СБОРНИК ТРУДОВ

СЕКЦИИ

Механика и моделирование материалов и технологий

МОСКВА, 2018

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Московский авиационный институт»
Национальный исследовательский университет**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана»**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН**

Механика и моделирование материалов и технологий. Сборник трудов Секции
Международной молодёжной научной конференции «XLIV Гагаринские чтения»
17-20 апреля 2018, Москва, ИПМех РАН, 2018.-182 с.

Сборник содержит материалы докладов, представленных на заседаниях Секции
Механика и моделирование материалов и технологий Международной молодёжной
научной конференции "XLIV Гагаринские чтения".

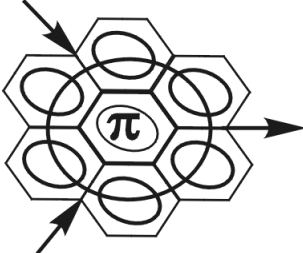
Работы представлены по следующим научным направлениям:

- Модели материалов (в том числе наноматериалов, материалов с памятью формы).
- Методы определения свойств материалов.
- Связи макроскопических свойств материалов с их структурой.
- Механика и расчетно-экспериментальное моделирование технологических процессов: механика технологических процессов (модели, методы расчета, пакеты программ).
- Экспериментальная механика деформируемого твердого тела.
- Расчет и моделирование напряженного состояния, прочности и разрушения элементов конструкций.

ISBN 978-5-91741-213-9

055(02)2 © Институт проблем механики РАН 2018 г.

**МЕЖДУНАРОДНАЯ МОЛОДЁЖНАЯ НАУЧНАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ
«XLIV ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ»**

	СЕКЦИЯ <i>Механика и моделирование материалов и технологий</i> Mechanics and modeling of materials and technologies
---	--

Руководители секции: Климов Дмитрий Михайлович, г.н.с. лаборатории радиационной газовой динамики ИПМех РАН, Академик РАН

Беклемишев Нил Нилович, зав. кафедрой «Физика конструкционных материалов» МАИ (НИУ), Заслуженный деятель науки РФ, проф., д.ф.-м.н.

Учёный секретарь: Лямина Елена Алексеевна
с.н.с. ИПМех РАН, к.ф.-м.н.
e-mail: gagarin@ipmnet.ru

Члены локального оргкомитета: Волков М. А., к.ф.-м.н., н.с.
Георгиевский Д. В., д.ф.-м.н., с.н.с.
Капцов А. В., доц., к.ф.-м.н., с.н.с.
Каспарова Е. А., прогр.
Кузнецов С. В., проф. д.ф.-м.н., в.н.с.
Лебедев И. М., м.н.с.
Лисовенко Д. С., к.ф.-м.н., с.н.с.
Мокряков В. В., к.ф.-м.н., н.с.
Манжиров А. В. проф., д.ф.-м.н., г.н.с.
Паришин Д. А., доц., к.ф.-м.н., с.н.с.
Попов А. Л., проф., д.ф.-м.н., в.н.с.
Устинов К. Б., доц., д.ф.-м.н., с.н.с.
Ченцов А. В., к.ф.-м.н., с.н.с.
Шифрин Е. И., д.ф.-м.н., г.н.с.

Секция «Механика и моделирование материалов и технологий» создана в 1990е годы на основе базовой кафедры МАТИ в Институте проблем механики РАН (ИПМех РАН). Одним из создателей и соруководителем Секции был Роберт Вениаминович Гольдштейн (07.05.1940 – 24.09.2017), выдающийся ученый в области механики деформируемого твердого тела и ее приложений в технике и технологии, один из крупнейших отечественных ученых в механике прочности и разрушения конструкционных материалов. Приоритетом для Роберта Вениаминовича была поддержка и продвижение молодежной науки. За время работы секции более 500 участников – школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых, - выступили с докладами. В дальнейшем многие из них остались в науке, защитили кандидатские и докторские диссертации, активно сотрудничают с лабораториями ИПМех РАН, и продолжают традиции молодежной науки в качестве научных руководителей. Вокруг секции за время ее существования сложился круг постоянных участников - ВУЗов и организаций, которые из года в год, вот уже несколькими поколениями студентов и аспирантов участвуют в проведении заседаний секции.

Память о Роберте Вениаминовиче Гольдштейне, выдающемся ученом и организаторе науки, навсегда сохранится в наших сердцах.

В настоящем сборнике содержатся материалы докладов, представленных на заседаниях Секции «Механика и моделирование материалов и технологий» Международной молодежной научной конференции «XLIV Гагаринские чтения».

Содержание

Аккуратнова А. С. Пневмоформовка листовых конструкций из высокопрочных цветных сплавов в режиме кратковременной ползучести.....	9
Антонов А. М. Волны Рэлея на границе градиентно-упругого полупространства и их возбуждение движущимся источником	10
Баранов М. А. Математическая модель деформирования ГПУ-поликристалла с учётом обратных напряжений.....	11
Барсегян О. С. Влияние размера внутреннего дефекта микроструктуры на усталостные свойства титанового сплава ВТ3-1.....	14
Бессонов Д.А., Альшиц В.И., Любимов В.Н. Сжатие акустических пучков при их конверсионном отражении	15
Бриккель Д. М. Определение остаточного ресурса подкраново-подстропильной фермы с учетом накопления повреждений в реальных условиях эксплуатации	17
Брызгалов А.И. Численное моделирование горения в сверхзвуковом твердотопливном прямоточном воздушно- реактивном двигателе	19
Брюханов И. А., Лисовенко Д.С., Городцов В.А. Молекулярно-динамическое моделирование металлических хиральных нанотрубок.....	22
Буртасова М. В. Отслоение покрытия при нагружении	24
Бухалов В. И. Расчет упругопластической посадки колец.....	27
Волков А. В. Масштабные эффекты для тепловых напряжений в круглом диске с отверстием при осесимметричном стационарном температурном поле в рамках микродилатационной теории упругости.	28
Волков М. А., Городцов В. А., Лисовенко Д. С. Изменчивость модуля Юнга и коэффициентов Пуассона цилиндрически-анизотропных хиральных трубок из моноклинных кристаллов.....	29
Гаджибеков Т. А., Кузнецов С.В. Теоретические аспекты применения волн Похгаммера – Кри в задачах неразрушающей диагностики.	32
Галиева Э.В., Ахунова А.Х. Моделирование влияния деформации на формирование твердофазного соединения литого сплава ВКНА-25 с деформируемым ЭП975 при сварке давлением в условиях сверхпластичности.....	33
Гандилян Д. В., Идрисов Д.М. Вычисление коэффициента интенсивности деформации для осесимметричной задачи пластического течения трубы по жесткому волокну	35
Герасимов Р. М. Молекулярно-динамический подход к анализу структуры межзеренных границ	37
Гордеев И. С. Исследование фазовых переходов в цирконии методом молекулярной динамики ...	40
Грачёва Н. А. Численное моделирование распространения ударной волны с использованием модели высокоскоростной пластической деформации металлов.	41
Гулин В. В., Ефремов В. А. Энергетическая модель эволюции усталостной трещины типа «рыбий глаз»	42
Давлятшин Р.П. Исследование эволюции внутренней структуры бикристалла при деформировании	43
Давыдов С. А., Земсков А.В., Федорова А.Д. Моделирование связанных термоупругодиффузионных процессов при разработке новых материалов	46
Демин А.И., Лисовенко Д.С. Определение участков магистрального трубопровода с непроектными нагрузками по результатам анализа данных внутритрубной диагностики	48
Добрянский В. Н. Исследование механических свойств углепластика при статическом и высокоскоростном нагружении	50
Жигалова А. И. Математика архитектуры однополостного гиперболоида в аддитивных технологиях.....	51
Загаровский А. А. Оценка предельного состояния металла с помощью энергетического аналога эквивалентного воздействия	54
Иванов С. И. Взаимодействие однородной консольно-закрепленной пластины с плоской гармонической звуковой волной.....	55
Игушева Л. А. Анализ откольного разрушения в волновом поле Клейна-Гордона.....	56
Идрисов Д. М. Численное моделирование процесса осадки трехслойной жесткопластической полосы между параллельными плитами при различных режимах трения.....	57
Казаков К.Е. Осесимметричная задача о контакте жесткого штампа и основания с покрытием с учетом сложных форм контактирующих поверхностей	58
Каспарова Е. А. Вычисление коэффициентов матрицы упругой заделки для задачи об отслоении тонкой полосы от полуплоскости	61

Климова Т. Ю., Ледяев М. Е., Чаплыгин К.К. Исследование влияния частиц SiC на напряженно-деформированное состояние алюминиевого сплава АК12 методами конечно-элементного моделирования и силовой зондовой микроскопии	64
Комарова М. А. Лисовенко Д. С., Городцов В. А. Экстремальные значения основных упругих характеристик для гексагональных кристаллов	66
Кравченко М. Ю., Красницкий С. А. Образование призматической дислокационной петли несоответствия в композитной декаэдрической наночастице	69
Красницкий С. А., Смирнов А. М. Напряженное состояние упругого цилиндра с включением в виде длинной треугольной призмы	71
Крутиков П. В. Исследование влияния знакопеременного деформирования на силовые параметры процесса прямого выдавливания	72
Кузин А.О. Влияние кристаллографической ориентации структуры материала на его предельные деформационные возможности в различных операциях листовой штамповки	73
Кукуджанов К.В., Кузнецов С.Н., Ченцов А.В., Макеев Е.В., Сайфутдинов Ю.Н. Электропластичность металла при воздействии импульсным высокоэнергетическим электромагнитным полем	75
Лаврентьев С. Ю., Лисовенко Д.С., Ченцов А.В. Механические свойства двумерной аусетической конструкции	76
Ледовских Д. С. Математическое моделирование распространения волн в слоистой среде с вязкопластическим проскальзыванием	79
Ледяев М. Е., Полянская Л.В., Писарев А.В. Моделирование процесса зарождения трещин в конечно-элементной модели пористого алюминиевого сплава с различным характером расположения пор	82
Лобода П.С., Ледяев М.Е., Воронин С.В. Учет поверхностного натяжения в конечно-элементной модели образца алюминиевого сплава при одноосном растяжении	84
Лоевец Д. А. Исследование эффектов запаздывания векторных свойств при деформировании по ломанным траекториям	85
Лукин А. В., Попов И. А. Нелинейная динамика и устойчивость упругих элементов нано- и микросистемной техники в связанных термоэлектрических полях	88
Максимова К. А. М., Ченцов А. В. Исследование механических свойств плоских и трубчатых ячеистых конструкций с аусетическим поведением при одноосном растяжении	90
Матасов И. И. Изотермическое формоизменение алюминиевых тонкостенных листовых изделий в режиме кратковременной ползучести	93
Микрюков А. О. Исследование влияния температурно-скоростного режима нагружения на процессы интенсивных неупругих деформаций	94
Мифтахова А. Р. Задача о качении с проскальзыванием периодической системы цилиндров по вязкоупругому основанию	97
Михалева А. Д. Экран от конвективного теплообмена	98
Морозов А. В., Маховская Ю.Ю. Теоретико-экспериментальное исследование трения скольжения резин с различными адгезионными свойствами	101
Мушак Н.Д. Построение и применение парных силовых потенциалов взаимодействия для моделирования структурного перехода ГЦК-ОЦК	102
Низамаев Т. М. Анализ эффекта траншейного барьера на подвижную группу нагрузок с помощью численного моделирования Abaqus.	104
Овчинников Е. И. Описание механизмов разрушения в моделях неупругого деформирования поликристаллических тел	105
Озерных В. С. Математическая модель для описания накопления поврежденности в приграничной области в поликристаллических материалах	106
Окатьев Р. С., Зубко И.Ю. Градиент плотности материала как независимая степень свободы сплошной среды	109
Паршин Д.А. Модель аддитивного изготовления тяжелых сводчатых конструкций из упругих и вязкоупругих материалов с применением управляющих технологических воздействий	111
Петрухин Н. В. Разработка специальной конструкции установки для технологического процесса профилирования металлических ободьев	114
Попов Ф.С. Описание прерывистой пластичности при помощи дислокационной модели	115
Поцелуев К. О. Разработка оснастки для проведения многофакторного эксперимента для процесса прямого выдавливания	117
Романов П. В. Подход к моделированию операции изотермической вытяжки осесимметричной детали в конической матрице из анизотропного материала в режиме кратковременной ползучести.	118
Румачик М.М. Особенности применения композитных материалов при проектировании упругих	

элементов	119
Рысаева Л. Х., Баимова Ю.А. Влияние гидростатического давления на свойства фуллеранов	122
Рэйляну М. Д., Авдюхина В.М., Хрущов М.М. Структурные и функциональные характеристики хром-углеродных покрытий, полученных магнетронным распылением хром-наноалмазных мишеней.....	125
Самохвалов И. А. Оценка живучести стального сетчатого купола при статическом и динамическом нагружениях.....	128
Самсонов Н. А. Анализ влияния формы заходной части матрицы на кинематику течения металла при формоизменении плоской заготовки	131
Сафронов П. А. Цилиндрический изгиб пластинки из сплава с памятью формы с учетом разносопротивляемости этого материала. Мартенситная неупругость.....	132
Селиванова О. С. Волновой теплоперенос в анизотропном полупространстве в условиях волнового теплопереноса под действием точечного источника теплоты	134
Семенов П. Е., Корнев Ю.В., Хазова В.А. Упрочнение эластомерных композитов модифицированным нанодисперсным шунгитом.	136
Смирнова Д. Е., Гордеев И.С. Атомистическое моделирование стабильности высокотемпературной фазы циркония	139
Степанов Л. И. Влияние высокоэнергетического электромагнитного поля на некоторые характеристики конструкционной прочности проводящих материалов.....	140
Стеценко Н. С. Идентификация и верификация нелинейного определяющего соотношения Работнова по данным испытаний высоконаполненного полиэтилена	141
Стратула Б. А. Определение критической плоскости для многоосного циклического нагружения со сдвигом фаз.....	142
Сурудин С.В., Ерисов Я.А., Кузин А.О. Влияние кристаллографической ориентации структуры материала на его предельные деформационные возможности в различных операциях листовой штамповки.....	145
Тельканов М. А. Моделирование измельчения зеренной структуры поликристаллов в процессах интенсивных пластических деформаций.....	148
Тептеева Е. С., Колесников А.Ф. Применение теории локального моделирования для экстраполяции дозвуковых режимов ВЧ-плазмотрона на условия входа затупленного тела в атмосферу	150
Терауд В.В., Валисовский Н.Е. Сложности, связанные с проведением высокотемпературных экспериментов при ползучести металлов	153
Тесаков Д. М. Исследование силовых параметров процесса изотермического радиального выдавливания заготовок из цветных металлов и сплавов.....	155
Тишин Н. А. Исследование механизмов зарождения усталостных трещин в титановых сплавах при СВМУ нагружении	156
Ткаченко В. Г., Зинин А. С. Построение методики теоретического расчета КИН, представленного через амплитуду смещений для случая высокочастотного нагружения. Расчет поправочной геометрической функции в определенном для ВЧН выражении КИН.	157
Тюрин А. В. Исследование причины снижения точности и проведение мероприятий направленных на повышение качества собранных узлов компрессора.....	158
Фадеев Е. П., Идрисов Д. М. Применение теории идеального течения пластических сред к дизайну процесса плоской экструзии.....	160
Федоренко Р. В., Кудрявцев А. А. Разработка теории многокомпонентной среды для описания динамических процессов в материалах со сложной реологией.....	163
Фомин Е. В. Изучение зарождения дислокаций на границе зерна в ГЦК поликристаллах.....	165
Чечулина Е.А. Модель для описания неустойчивого пластического деформирования.....	166
Шабайкин Р. Р. Динамические эффекты деформирования пластического слоя между жесткими цилиндрами.....	167
Шварёв Н. Г., Старобинский Е.Б. Численное моделирование процесса перераспределения тепловой энергии в нелинейном двумерном кристалле с треугольной решёткой	168
Шелест Д. О. Оптимизация технологического процесса изотермической прошивки патрубков с наклонным фланцем с помощью метода верхних оценок	171
Шешенин М. А. Разработка технологии получения магнитной жидкости с оптимальными свойствами для магнитно-жидкостных уплотнителей.....	172
Шипунов В. В., Десюкевич К. Ю. Методика измерения деформаций проволочной основы материала МР при испытаниях на разрыв	173
Якимова Е. И. Создание новой арматурной сетки с квадратными ячейками	175
Яковенко А. А. Взаимодействие инструмента с вязкоупругой тканью	178

Яковлев С. С. Вытяжка изделий с широким фланцем через радиальную матрицу	180
Яруллин Д. Т. Расчёт морфологических характеристик кристаллических структур в переохлажденной металлической пленке	181

ПНЕВМОФОРМОВКА ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ В РЕЖИМЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Аккуратнова А. С.

Научный руководитель — доцент, д.т.н. Ларин С.Н.

Тульский государственный университет, Политехнический институт, Кафедра Механики пластического формоизменения

E-mail: sulee@mail.ru

Конструкции ответственного назначения, в основном состоящие из нескольких слоев, каждый из которых является листом высокопрочного цветного сплава, весьма востребованы при изготовлении деталей повышенной удельной прочности. Сравнивая их с конструкциями, полученными в ходе пайки или клепки, можно отметить, что они отличаются заметно меньшей массой, трудоемкостью получения и большей надежностью. Рациональной технологией производства многослойных, и в частности трехслойных, конструкций является их формоизменение инертным газом в безвоздушном пространстве или пространстве, заполненном инертными газами, изначально соединенных различными видами сварки.

Можно выделить несколько способов изготовления трехслойных листовых конструкций пневмоформовкой:

- деформирование листов на гидравлическом прессе с приданием им трапециевидной формы, диффузионная сварка с дальнейшей калибровкой конструкции газом;
- деформирование одного из наружных слоев, к которому в требуемых местах приварен внутренний. При этом внутренний слой, то есть наполнитель растягивается. При этом образуются полости, форма которых близка к требуемой. Процесс осуществляют созданием давления газа, подаваемого в пространство между листами.

В работе рассмотрен процесс формоизменения трёхслойной конструкции с каналами трапециевидной формы, слои которой характеризуются анизотропией в режиме ползучести при вязком течении. При расчете упругими составляющими пренебрегаем.

Деформирование трапециевидного канала в трехслойной конструкции осуществляется под воздействием давления газа, которое меняется в соответствии с законом нагружения. Принято допущение, что ассоциированный закон течения справедлив при кратковременной ползучести. Под кратковременной ползучестью понимается медленное деформирование в условиях вязкого или вязкопластического течения, упругими составляющими деформации пренебрегаем. Материал деформируемого изделия считается ортотропным с главными осями анизотропии.

Предполагается, что материал при пневмоформовке проявляет либо вязкие, либо вязкопластические свойства.

Выведены выражения, с использованием которых выполнен анализ силовых режимов и геометрических размеров изготавливаемого изделия при формообразовании и одновременной калибровке в условиях постоянного температурного интервала листовых трехслойных изделий с трапециевидным внутренним сечением. Расчеты проведены для ряда труднодеформируемых цветных сплавов.

Выполнено моделирование процесса формоизменения листовых трехслойных изделий с трапециевидным внутренним сечением, слои которой характеризуются анизотропией в режиме ползучести при вязком течении, по результатам которого получены выражения для оценки силы и параметров качества получаемых изделий. Установлено влияние времени деформирования на относительные величины давления газа, толщины наполнителя и угла конуса полости трапециевидного элемента.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 16-08-00020.

ВОЛНЫ РЭЛЕЯ НА ГРАНИЦЕ ГРАДИЕНТНО-УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА И ИХ ВОЗБУЖДЕНИЕ ДВИЖУЩИМСЯ ИСТОЧНИКОМ

Антонов А.М.

Научный руководитель — профессор, д.ф.-м.н. Ерофеев В. И.
ИПФ РАН, Механико-математический факультет, Кафедра механики
E-mail: yulich-16@mail.ru

В двумерной постановке решена задача о распространении упругой поверхностной волны на границе градиентно-упругого полупространства (т.е. обобщенного континуума, напряженно-деформированное состояние которого описывается тензором деформаций, вторыми градиентами вектора перемещений, несимметричным тензором напряжений и тензором моментных напряжений). Решение уравнений отыскивалось в виде суммы скалярного и векторного потенциалов, причем у векторного потенциала отлична от нуля только одна компонента. Показано, что такая волна, в отличие от классической волны Рэлея, обладает дисперсией. Вычислена зависимость фазовой скорости поверхностной волны от волнового числа, проведено ее сравнение с дисперсионной характеристикой фазовой скорости объемной сдвиговой волны. Рассчитаны напряжения и перемещения, возникающие в зоне распространения поверхностной волны. Показано, что скорость поверхностной волны, распространяющейся вдоль свободной границы градиентно-упругого полупространства, может превосходить скорость объемной сдвиговой волны, вычисляемую как радикал отношения модуля сдвига к плотности материала. Однако в рассматриваемой среде сдвиговая волна также обладает дисперсией, и значение указанной скорости является лишь нижним пределом ее фазовой скорости. Таким образом, в градиентно-упругой среде фазовая скорость поверхностной волны не может превосходить фазовую скорость объемной сдвиговой волны, но, при определенных значениях волнового числа, может достигать ее.

Изучаются особенности генерации волн источником возмущений, движущимся вдоль границы градиентно-упругого полупространства.

Работа выполнялась при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-01637).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГПУ ПОЛИКРИСТАЛЛА С УЧЁТОМ ОБРАТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Баранов М.А.

Научный руководитель — доцент, к.ф.-м.н. Волегов П. С.
ПНИПУ, Факультет прикладной математики и механики, Кафедра Математическое
моделирование систем и процессов
E-mail: maximbaranov.123@gmail.com

Рассматривается процесс упрочнения поликристаллических материалов с гексагональной плотноупакованной (ГПУ) решёткой. Появление обратных напряжений связывается с образованием дислокационных барьеров различного типа и последующим формированием вблизи них дислокационных скоплений. Приведены основные соотношения двухуровневой упруговязкопластической модели неупругого деформирования поликристаллов на базе физической теории пластичности. Проведена классификация барьеров в ГПУ решётках. Получены и проанализированы зависимости интенсивности напряжений от интенсивности деформаций с учетом и без учета обратных напряжений, показана необходимость учета обратных напряжений в физических моделях пластичности.

Титан и его сплавы обладают оптимальным соотношением высокой прочности и относительно небольшой плотности, вследствие чего являются одними из наиболее популярных материалов в авиационной и аэрокосмической отраслях. В силу этого актуальным становится изучение прочностных характеристик и дефектной структуры таких материалов. В работе сделан акцент на изучение процессов упрочнения, которые, с одной стороны, проявляются на уровне макроскопических свойств образца или конструкции, но с другой стороны, на уровне кристаллической решетки обусловлены появлением и эволюцией полей внутренних напряжений, создаваемых барьерами различного типа, в том числе – дислокационными. Таким образом, целью работы является разработка математической модели деформирования металла с ГПУ решёткой с учетом внутренних («обратных») напряжений.

Появление обратных напряжений вызвано, в первую очередь, образованием дислокационных барьеров и создаваемыми ими полями напряжений, поэтому для корректного определения обратных напряжений важно понимать, с какими конкретно взаимодействиями и реакциями связано образование барьеров того или иного типа. Следовательно, одной из задач исследования была классификация барьеров в ГПУ решётках.

Дислокационные барьеры возникают при деформировании моно- или поликристаллов как результат дислокационных реакций и, в свою очередь, взаимодействуют с другими дислокациями, барьерами или дефектными субструктурами. Поля напряжений таких структур обуславливают появление т.н. «обратных», или внутренних напряжений (в англоязычной литературе – «back stresses»), а обратные напряжения, в свою очередь, приводят к необходимости учета эффективных сдвиговых напряжений, которые можно определить как разность приложенных внешних напряжений на системе скольжения и обратных напряжений.

Описание перечисленных выше эффектов было включено в модификацию двухуровневой упруговязкопластической модели неупругого деформирования ГПУ поликристалла, где в качестве элемента макроуровня рассматривается представительный объем поликристалла, а элементом мезоуровня выступает отдельный однородный кристаллит. Считается, что основной вклад в неупругое деформирование вносит движение краевых дислокаций по кристаллографическим системам скольжения. В качестве определяющего соотношения на каждом из масштабных уровней используется закон Гука в скоростной релаксационной форме. Напряжения на макроуровне определяются осреднением напряжений в элементах мезоуровня. Для связи уровней принята расширенная гипотеза Фойгта, согласно которой меры скорости деформации всех зерен совпадают с мерой скорости деформации представительного объема поликристалла. Ниже приведена система уравнений, описывающих напряжённо-деформированное состояние элемента мезоуровня [1]:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{n} : \dot{\boldsymbol{\zeta}}^e = \mathbf{n} : (\dot{\boldsymbol{\zeta}} - \dot{\boldsymbol{\zeta}}^{in}), \\ \dot{\boldsymbol{\zeta}}^{in} = \sum_{k=1}^n \dot{\gamma}^{(k)} \mathbf{n}^{(k)} \mathbf{b}^{(k)}, \\ \boldsymbol{\tau}^{(k)} = \mathbf{n}^{(k)} \mathbf{b}^{(k)} : \boldsymbol{\sigma}, \\ \dot{\boldsymbol{\zeta}} = \mathbf{Z}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений Коши; $\dot{\boldsymbol{\zeta}}, \dot{\boldsymbol{\zeta}}^{in}$ – мера скорости деформации и ее неупругая составляющая; $\mathbf{n}$ – тензор модулей упругости; $\mathbf{n}^{(k)}, \mathbf{b}^{(k)}$ – векторы нормали и Бюргерса k -ой системы скольжения; $\boldsymbol{\tau}^{(k)}$ – действующее касательное напряжение.

Следующее соотношение позволяет определить скорость сдвига на системах скольжения [2]:

$$\dot{\gamma}^{(k)} = \dot{\gamma}_0 \left(\frac{\tau_{eff}^{(k)}}{\tau_c^{(k)}} \right)^{1/m} \exp \left[-\frac{G_0}{kT} \left(1 - \frac{\tau_{eff}^{(k)}}{\tau_c^{(k)}} \right) \right] \text{sign}(\tau_{eff}^{(k)}), \quad (2)$$

где $\dot{\gamma}_0$ и m – параметры материала; T и k – абсолютная температура и постоянная Больцмана соответственно; G_0 – энергия, необходимая для активации движения дислокаций по системам скольжения.

Эффективное сдвиговое напряжение $\tau_{eff}^{(k)}$ определяется как [3]:

$$\tau_{eff}^{(k)} = \tau^{(k)} - \tau_b^{(k)}, \quad (3)$$

где $\tau^{(k)}$ – действующее касательное напряжение, $\tau_b^{(k)}$ – обратное напряжение.

Обратные напряжения можно найти с помощью следующего соотношения:

$$\tau_b^{(k)} = \boldsymbol{\sigma}^{int} : \mathbf{n}^{(k)} \mathbf{b}^{(k)}, \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\sigma}^{int}$ – поле внутренних напряжений, создаваемое дислокационными барьерами и другими препятствиями для скольжения дислокаций.

Базовое слагаемое закона упрочнения находится как [4]:

$$\dot{\tau}_c^{(k)} = \tau_{c0}^{(k)} \dot{\gamma}_0 \left(\sum_{i=1}^{24} a_i^{(k)} \left(\frac{\gamma^{(i)}}{\sum_{j=1}^{24} \gamma^{(j)}} \right)^\psi \left(\frac{\dot{\gamma}^{(i)}}{\dot{\gamma}_0} \right)^\delta \right), \quad k, j = \overline{1, K}, \quad \delta, \psi > 0, \quad (6)$$

где $\tau_{c0}^{(k)}$ – начальные касательные напряжения; $\sum_{i=1}^{24} a_i^{(k)}$ – матрица коэффициентов упрочнения.

В результате серии численных экспериментов по деформированию представительного объема поликристалла с ГПУ решёткой получены зависимости интенсивности напряжений от интенсивности деформации. Параметры материала соответствовали α -Ti. Получены оценки для обратных напряжений, создаваемых барьерами различного типа.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-1298.2017.1.

Литература

1. Трусов П.В., Волегов П.С., Кондратьев Н.С. Физические теории пластичности: учебное пособие. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 244 с.
2. Bayley C.J., Brekelmans W.A.M., Geers M.G.D. A comparison of dislocation induced back stress formulations in strain gradient crystal plasticity// Int. J. Solids Struct. – 2006. – Vol. 43. – Pp. 7268–7286.
3. Duchêne L., Geers M.G.D., et al. Multiscale modeling of equal channel angular extruded aluminium with strain gradient crystal plasticity and phenomenological models// Proceedings

- of the 15th International Conference on the Texture of Materials (ICOTOM-15). – 2008. – Vol.1. – Pp. 1-8.
4. Трусов П.В., Волегов П.С., Нечаева Е.С. Многоуровневые физические модели пластичности: теория, алгоритмы, приложения// Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4-4. – С. 1808-1810.

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ВНУТРЕННЕГО ДЕФЕКТА МИКРОСТРУКТУРЫ НА УСТАЛОСТНЫЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ3-1

Барсегян О. С.

Научный руководитель — к.т.н. Никитин А. Д.

МАИ, Институт №11, Кафедра физики конструкционных материалов

E-mail: different_ovik@mail.ru

Экспериментальное исследование конструкционных материалов в области сверхмногоциклового усталости (СВМУ) показало, что при малых амплитудах (по сравнению с пределом текучести) и больших долговечностях (порядка $10^8 - 10^{10}$ циклов) происходит качественная смена механизма зарождения усталостной трещины: в отличие от области многоциклового усталости (МНЦУ) [1-3], где трещина зарождается на поверхности изделия, при СВМУ нагружении зарождение происходит во внутренних объемах материала. При подповерхностном зарождении, доминирующую роль в процессе формирования очага трещины играют дефекты микроструктуры, такие как неметаллические включения (преимущественно для сталей), литейные дефекты, поры (для алюминиевых сплавов) и кластеризация (для никелиновых и титановых сплавов). При этом было показано, что в случае неметаллических включений, усталостная прочность материала может быть оценена по значению его микротвердости, размеру и геометрическим особенностям внутреннего дефекта [4].

Показано, что подповерхностное зарождение усталостных трещин в области СВМУ для материалов без внутренних дефектов (включений) так же возможно. При этом зарождение трещины связано с наличием микроструктурной неоднородности материала (крупных альфа - пластин, агломераций структурных элементов, макро - зон и т. д.). При этом усталостное поведения материала со сложной микроструктурой характеризуется существенным разбросом экспериментальных значений усталостной прочности. Разброс по долговечности может составлять до трех порядков при заданном уровне напряжений. Таким образом, существует ярко выраженная область, в которой нарушается однозначное соответствие между уровнем напряжений и усталостной долговечностью. Данные области принято называть «областями бифуркации» [5].

В настоящей работе проводится анализ дефектов титанового сплава ВТ3-1 с целью определения предела усталости по формулам, предложенным в [4]. Оценивается максимальное значение предела усталости, соответствующее минимальным структурным неоднородностям титанового сплава ВТ3-1, а так же определение минимальных значений, характерных для дефектов максимального размера (агломераций). Полученные расчетные значения сравниваются с экспериментальными данными для СВМУ нагружения титанового сплава ВТ3-1 [6]. В результате исследования дается оценка величины зоны бифуркации для указанного сплава в области СВМУ нагружения.

Литература

1. Stanzl-Tschegg S.E. and Mayer H.: "Fatigue and fatigue crack growth of aluminum alloys at very high numbers of cycles". Int. J. Fatigue, 2001, 23: 231-237.
2. Bathias C. and Paris P.C.: "Gigacycle fatigue of metallic aircraft components". Int. J. Fatigue, 2001, 32: 894-897.
3. Shyam A., Allison J.E. and Jones J.W.: "A small fatigue crack growth relationship and its application to cast aluminum". Acta Mater, 2005, 53: 1499-1509.
4. Murakami Y.: - "Metal Fatigue: Effect of small defects and inclusion". Elsevier Science LTD, 2002.
5. Шанявский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации. - Уфа: Монография, 2007. - 495с.
6. Nikitin A., Palin-Luc T., Shanyavskiy A.: "Crack initiation in VHCF regime on forged titanium alloy under tensile and torsion loading modes", International Journal of Fatigue, Volume 93, Part 2, December 2016.

СЖАТИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ ПРИ ИХ КОНВЕРСИОННОМ ОТРАЖЕНИИ

Бессонов Д.А., Альшиц В.И., Любимов В.Н.
ИК РАН ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН
E-mail: dabessonov@gmail.com

Сформулированы условия резонансного возбуждения узкого акустического пучка высокой интенсивности, в основе которых лежит специфика анизотропии упругих свойств кристаллов. Резонанс возникает при специальной геометрии падения волны накачки на поверхность кристалла вблизи предельного угла полного внутреннего отражения.

Введение. Устройства, использующие ультра- и гиперзвук, широко применяются в современной технике, медицине и научном приборостроении [1, 2]. Особую роль при этом играют узкие акустические пучки высокой интенсивности. В работах [3-8] предложен новый принцип создания таких пучков, основанный на использовании специфики анизотропии упругих свойств кристаллов. Резонанс возникает при отражении от поверхности кристалла волны накачки вблизи порогового угла полного внутреннего отражения. В этом случае возбуждаемый пучок оказывается достаточно узким, распространяющимся близко к поверхности.

Если отраженный пучок близок по структуре к особой объемной волне (ООВ) [9] – собственной моде, то он становится интенсивным.

Варьируя геометрию распространения, можно минимизировать потери на отражение паразитной волны утечки, интенсифицируя тем самым возбуждаемый пучок.

Методы. Управление характеристиками резонанса можно обеспечить, во-первых, согласно [3-7], путем изменения ориентации сагиттальной плоскости, поворачивая ее вокруг нормали к поверхности кристалла. Во-вторых, согласно [8], это управление можно осуществить, варьируя ориентацию самой поверхности. В том и другом случаях регулируется и настроечный угол падения волны накачки. Во всех этих вариантах часть энергии возбуждаемого пучка неизбежно уносится волной утечки. Минимизация потерь на отток энергии в паразитной волне можно достичь, во-первых, подбором кристаллов с «подходящим» соотношением величин модулей упругости $c_{\alpha\beta}$. Так в гексагональных кристаллах при условиях, рассмотренных в [3], потери полностью будут исключены, если выполнено соотношение $c_{44} = c_{44}^0 = 2c_{66}$. В [5] нами было показано, что данный подход часто реализуем, если возбуждаемый пучок близок к симметричным направлениям в кристалле (например, к осям симметрии).

При этом удастся найти достаточное количество кристаллов с оптимальными параметрами. Наличие элементов симметрии значительно облегчает использование данного эффекта при изготовлении лабораторных и промышленных образцов.

Однако, при согласованном изменении сагиттальной плоскости и ориентации поверхности кристалла можно полностью исключить потери на отражение паразитной волны почти в любом кристалле, что отвечает полной конверсии отражения.

В частности были проведены расчеты, для т.н. «акустических» кристаллов, широко применяемых в акустике. К ним относятся, например, кварц, сегнетова соль, графит и т.д.

Проведенные оценки показывают возможность увеличения интенсивности в отраженном пучке по отношению к падающему в 5-10 раз при сжатии в одной плоскости и в 25-100 раз при сжатии в двух ортогональных направлениях. При этом требуемая величина настройки углов падения составляет $\sim 10^{-2}$ рад, что вполне реализуемо на практике.

Описанный здесь конверсионный резонанс может быть реализован только в кристаллах и принципиально не существует в изотропных телах. В изотропных средах при стремлении к углу полного внутреннего отражения доля энергии в преломленном пучке стремится к нулю по мере уменьшения его ширины [11].

Литература

1. К. С. Александров, Б. П. Сорокин, С. И. Бурков, Эффективные пьезоэлектрические кристаллы для акустоэлектроники, пьезотехники и сенсоров, Издательство сибирского отделения РАН, Новосибирск, Т. 1 (2007), Т. 2 (2008).
2. О. А. Сапожников, В. А. Хохлова, Медицинская физика № 11, 32 (2001).
3. В. И. Альшиц, Д. А. Бессонов, В. Н. Любимов, ЖЭТФ 143(6), 1077 (2013).
4. В. И. Альшиц, Д. А. Бессонов, В. Н. Любимов, Известия РАН, Сер. Физ. 78(10), 1287 (2014).
5. В. И. Альшиц, Д. А. Бессонов, В. Н. Любимов, ЖЭТФ 149(2), 00 (2016).
6. В. Н. Любимов, Д. А. Бессонов, В. И. Альшиц, Кристаллография 61(00), (2016).
7. Д. А. Бессонов, В. Н. Любимов, В. И. Альшиц, Известия РАН, Сер. Физ. 80(00), (2016).
8. В.И. Альшиц, Д.А. Бессонов, В.Н. Любимов, Кристаллография 58(6), 868 (2013).
9. В. И. Альшиц, Е. Лоте, Кристаллография 2(6), 1122 (1979).
10. Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik, Neue Serie, Gruppe III, B. 11, Gesamtherausgabe K.-H. Hellwege, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1979).
11. Л. М. Бреховских, О.А. Годин, Акустика слоистых сред, Наука, Москва (1989).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПОДКРАНОВО - ПОДСТРОПИЛЬНОЙ ФЕРМЫ С УЧЕТОМ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Бриккель Д.М.^{1,3}

Научный руководитель – профессор, д.ф.-м.н. Ерофеев В.И.^{1,2}

¹ННГУ, ²ИПМ РАН, ³ННГАСУ

E-mail: archive.94@mail.ru

Приводится методика расчета остаточного ресурса подкраново-подстропильной фермы с помощью модели накопления повреждений, позволяющая определить срок эксплуатации конструкции до ее разрушения. Предлагается теоретическая методика, опирающаяся на существующие экспериментальные данные.

Введение. Изучению процессов накопления повреждений в конструкционных материалах на стадии изготовления и эксплуатации уделяется особое внимание как в России, так и за рубежом. Численная оценка существующего количества повреждений, рассеянных в микрообъеме материала, является одной из основных задач современной науки и техники.

Объектом настоящего исследования является подкраново-подстропильная ферма (ППФ) пролетом 36 метров с неразрезным многопролетным нижним поясом коробчатого сечения (рис.1). Цель работы состоит в определении напряжённо – деформируемого состояния конструкции и разработке уточнённой методики оценки остаточного ресурса ППФ на стадии образования усталостной трещины и определение межремонтного периода.

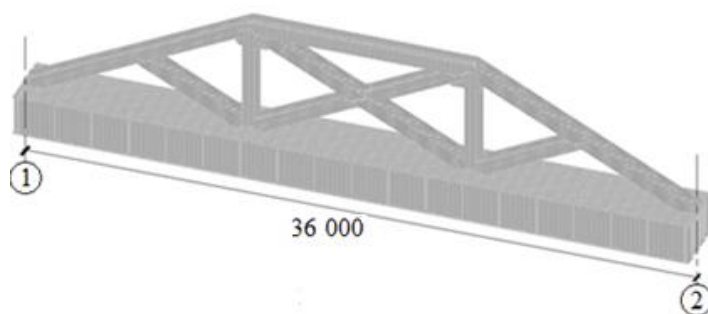


Рис. 1. Общий вид расчетной схемы подкраново-подстропильной фермы

Методы. Была разработана конечно-элементная модель ППФ. По результатам статического расчета конструкции проанализировано ее напряженно-деформированное состояние и определено расположение опасных зон концентрации напряжений. Установлена наиболее опасная область – узел сопряжения решетки с нижним поясом фермы.

За меру поврежденности принимается скалярный параметр, характеризующий относительную долю микродефектов в эталонном объеме материала. Этот параметр равен нулю, когда повреждения отсутствуют, и близок к единице в момент образования макродефектов, способствующих разрушению конструкции [1]. Под поврежденностью при данном подходе понимается сокращение упругого отклика тела вследствие сокращения эффективной площади, которое обуславливается появлением и развитием распределенных по объему материала микродефектов [2-10].

Эволюция поврежденности описывается кинетическим уравнением вида [3]:

$$\frac{d\Psi}{dt} \leq f(\sigma, \Psi) \quad (1)$$

где σ – внешнее действующее напряжение.

Функция $f(\sigma, \Psi)$ чаще всего аппроксимируется линейной зависимостью, иногда – полиномиальной зависимостью [3]. Для определения количества циклов до разрушения используется кривая усталости Веллера, полученная экспериментально (рис.2).

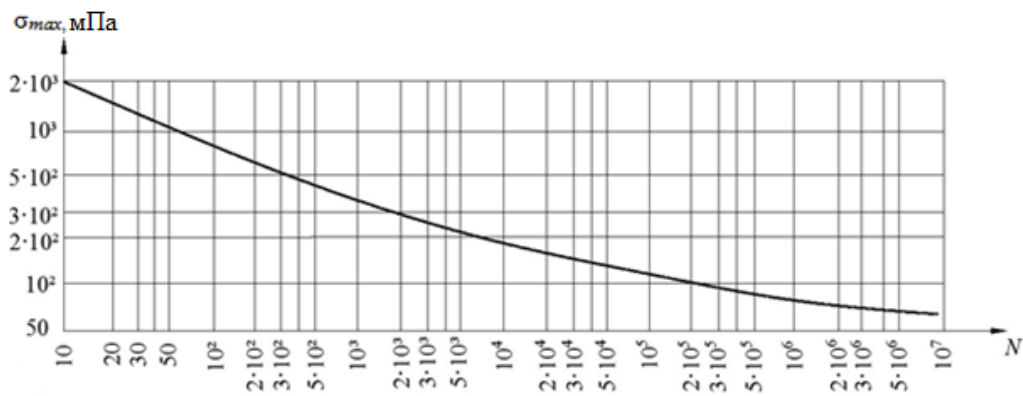


Рис. 2. Диаграмма Веллера для низколегированной конструкционной стали 09Г2С

По результатам расчета установлены параметры поврежденности конструкции за определенные периоды времени: повреждения, накапливаемые за 1 цикл, за 1 рабочий день, а также повреждения, соответствующие разрушению конструкции.

Согласно технологии, за 1 день (2 смены) кран совершает 30 рабочих циклов. Количество рабочих дней в году – 244, откуда следует:

$$\Psi_d \cdot K_{ц/д} \cdot K_d \leq \Psi_{разр.} = 1 \quad (2)$$

где Ψ_d – значение поврежденности, накапливаемой в материале конструкции за 1 цикл работы крана; $K_{ц/д}$ – количество циклов работы крана в день; K_d – количество рабочих дней, $\Psi_{разр.}$ – значение поврежденности, соответствующее разрушению. Количество дней безаварийной работы крана составляет $K_d = 1\,944$ дня, или 7 лет и 236 дня.

Предложенная методика позволяет определить остаточный ресурс конструкции в эксплуатационных условиях, осуществить своевременное реагирование по принятым решениям для дальнейшей эксплуатации или снятия подкраново-подстропильной фермы с работы.

Работа выполнялась при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-01637).

Литература

- Ерофеев, В. И. Самосогласованная динамическая задача оценки поврежденности акустическим методом / В. И. Ерофеев, Е. А. Никитина // Акустический журнал. – 2010. – Т. 56, № 4. – С. 554–557.
- Голуб, В. П. Определяющие уравнения в нелинейной механике поврежденности / В. П. Голуб // Прикладная механика. – 1993. – Т. 29, № 10. – С. 37–49.
- Ерофеев, В. И. Дисперсия и затухание акустической волны, распространяющейся в поврежденном материале / В. И. Ерофеев, Е. А. Никитина, П. А. Хазов // Приволжский научный журнал / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Нижний Новгород, 2014. – № 4. – С. 22–28.
- Хорошун, Л. П. Основы микромеханики повреждаемости материала. Длительная повреждаемость / Л. П. Хорошун // Прикладная механика. – 2007. – Т. 43, № 2. – С. 1–2.
- Khoroshun, L. P. Micromechanics of Short-Term Thermal Microdamageability / L. P. Khoroshun // Int. Appl. Mech. – 2001. – 37, № 9. – P. 1158–1165.
- Качанов, Л. М. Основы механики разрушения / Л. М. Качанов. – Москва : Наука, 1974. – 311 с.
- Коллинз, Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение / Дж. Коллинз. – Москва : Мир, 1994. – 624 с.
- Khoroshun, L. P. Short-Term Microdamageability of Laminated Materials under Thermal Actions / L. P. Khoroshun, E. N. Shikula // Int. Appl. Mech. – 2002 – 38, № 4. – P. 432–439.
- Maugin, G. A. The Thermomechanics of Plasticity and Fracture / G. A. Maugin. – Cambridge (UK) : Cambridge University Press, 1992. – 350 с.
- Ерофеев, В. И. Влияние поврежденности материала на эволюцию акустической волны / В. И. Ерофеев, Е. А. Никитина, П. А. Хазов // Приволжский научный журнал / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Нижний Новгород, 2015. – № 2. – С. 32–42.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ТВЕРДОТОПЛИВНОМ ПРЯМОТОЧНОМ ВОЗДУШНО- РЕАКТИВНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Брызгалов А.И.

Научный руководитель – д.ф.-м.н. Якуш С.Е.

ИПМех РАН

E-mail: bryzgalov@ipmnet.ru

В работе рассчитаны поля течения, зона горения, распределения температуры, давления, концентрации горючего и продуктов горения в камере сгорания модельного твердотопливного прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Показана чувствительность характеристик работы двигателя к изменению цилиндрической части сечения канала.

Введение. В связи с перспективностью применения прямоточного воздушно-реактивного двигателя на твердом топливе (ПВРДТТ) для сверхзвуковых и гиперзвуковых летательных аппаратов возникает необходимость моделирования протекающих в камере сгорания процессов с целью обеспечения устойчивой работы в широком диапазоне параметров и выбора оптимальной формы заряда. Дозвуковой ПВРД превосходит обычный ТРД по удельному импульсу при скоростях полета $M > 2,5$, при $M > 5$ эффективным является ПВРД со сверхзвуковым потоком в канале [1]. Широкому распространению прямоточных двигателей препятствуют неустойчивость их работы и узкие диапазоны рабочих параметров, в которых возможно горение. В данной работе проведено численное исследование работы двигателя и представлены результаты для нескольких размеров камеры сгорания, демонстрирующие влияние геометрии на процесс горения на сверхзвуковых режимах.

Постановка задачи. Течение рассматривается в осесимметричной постановке. Двумерная модель включает уравнения движения многокомпонентного вязкого сжимаемого теплопроводного газа, подчиняющегося уравнению Менделеева-Клапейрона, уравнение энергии, k -epsilon модель турбулентности, уравнения переноса компонент топлива, окислителя и продуктов реакции. Используется модель турбулентного горения EDC (Eddy Dissipation Concept), в которой скорость химических превращений считается бесконечно большой, так что скорость турбулентного горения определяется интенсивностью смешения компонентов смеси. В качестве твердого топлива взят плексиглас (ПММА), который при нагревании газифицируется, в результате чего в газовую фазу поступает мономер ММА ($C_5H_8O_2$). Камера сгорания состоит из стабилизатора диаметром $D_{fh} = 30$ мм и длиной $L_{fh} = 50$ мм, цилиндрической части диаметром $D_{cyl} = 14.5$ мм и длиной $L_{cyl} = 35$ мм и конической части с углом расширения $\alpha = 3^\circ$ [1]. В качестве параметров на входе задаются температура торможения $T = 1156$ К и давление торможения $P = 16.68$ атм., взятые из эксперимента [1] и соответствующие устойчивой работе ПВРД. Поскольку в процессе работы двигателя происходит выгорание твердого топлива и изменение ширины канала заряда, расчеты проводились также при диаметрах цилиндрической части $D_{cyl} = 16.5$ мм и $D_{cyl} = 18.5$ мм. Для получения на входной границе чисел $M > 1$ используется сопло Лавала, на дозвуковом входе которого задается статическое давление $P_0 = 15.7$ атм, температура $T_0 = 1138$ К и скорость $V_0 = 200$ м/с.

Методы. Задача решалась численно на равномерной декартовой сетке в цилиндрической системе координат при помощи явной консервативной схемы высокого порядка точности с малой диссипацией. Геометрия описывалась методом «погруженных границ», согласно которому граница описывается поверхностью нулевого уровня функции расстояния, а в пересекаемых поверхностью ячейках соответствующим образом рассчитываются векторы потоков. В качестве базовой была взята программа RAMJET [2], реализованная на FORTRAN95 и использовавшаяся для расчета дозвуковых режимов работы ПВРДТТ. В настоящей работе программа была модернизирована с целью расчета сверхзвуковых режимов. Потоки на границах ячеек рассчитывались по схеме SLAU [3], хорошо

зарекомендовавшей себя при произвольных числах Маха. Для обеспечения зажигания смеси в камере сгорания, на начальном интервале до 1 мс по всей поверхности канала на границу подавался искусственный тепловой поток $q_s = 1 \text{ кВт/м}^2$, после чего включалась обратная связь между скоростью газификации и реальным тепловым потоком.

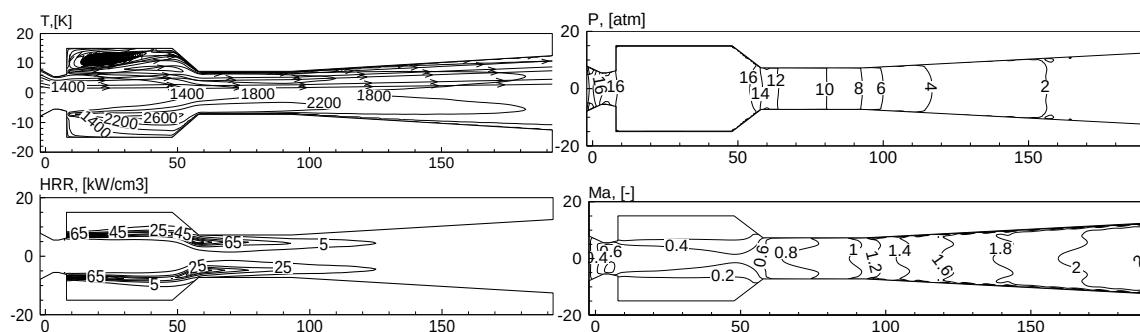


Рис.1. Температура, давление, объемная мощность тепловыделения и число Маха.

$D_{cyl} = 16.5 \text{ мм}$ из [1].

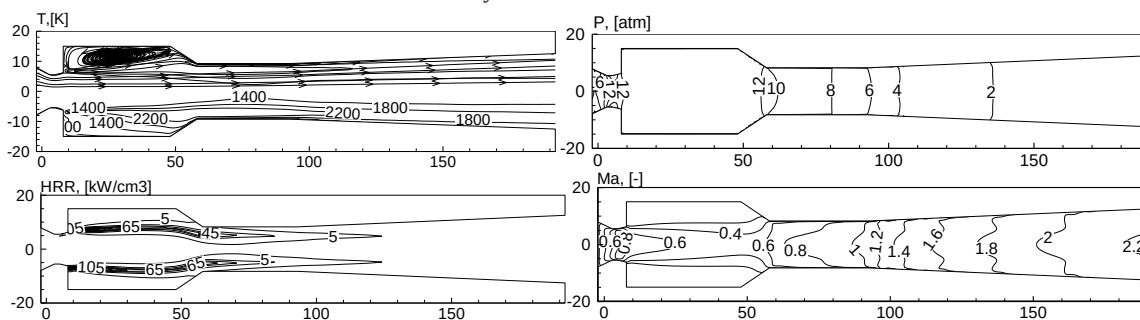


Рис.2. Температура, давление, объемная мощность тепловыделения и число Маха.

$D_{cyl} = 16.5 \text{ мм}$

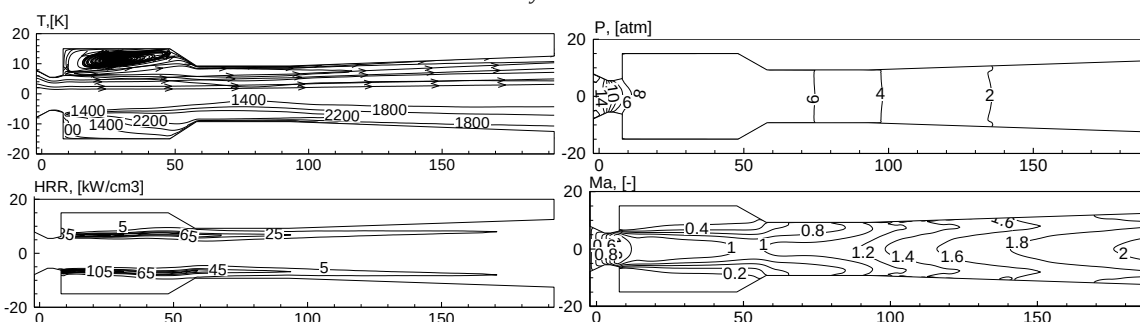


Рис.3. Температура, давление, объемная мощность тепловыделения и число Маха.

$D_{cyl} = 18.5 \text{ мм}$

Результаты. Расчет процессов в двигателе проводился на протяжении 5 мс, в течение которых достигался стационарный режим. На рис. 1, 2 и 3 показаны установившееся поле температуры, давления, распределение числа Маха в канале и объемная мощность тепловыделения в зоне реакции, где происходит диффузионное горение газифицированного с поверхности заряда топлива в кислороде, поступающем в канал с воздухом. На поле изотерм наложены линии тока, демонстрирующие зону вихревого течения в стабилизаторе. В передней части камеры сгорания образуется рециркуляционная зона, горение в которой обеспечивает необходимое количество тепла для газификации твердого топлива со стенок стабилизатора и поддержание пламени в канале. Зона реакции начинается у входного отверстия стабилизатора, что может быть связано с допущением о бесконечной скорости горения (при больших сверхзвуковых скоростях и конечной скорости горения пламя может

отойти на некоторое расстояние от входного отверстия). Горение в цилиндрической части заряда поддерживается пламенем из стабилизатора.

Расчеты показали, что при диаметре цилиндрической части канала $D_{cyl} = 14.5$ мм течение в стабилизаторе носит дозвуковой характер, при этом развиваются давления близкие к давлению торможения (см рис. 1). С увеличением D_{cyl} на 2 мм (рис. 2) происходит падение максимального давления до 12 атм и незначительный рост числа Маха и объемной мощности тепловыделения, при этом течение остается дозвуковым. Дальнейшее увеличение диаметра до $D_{cyl} = 18.5$ мм (рис. 3) приводит к переходу на сверхзвуковой режим течения во всей камере сгорания, включая стабилизатор. Максимальное давление падает до 8 атм, зона реакции распространяется дальше в канал и в расширяющуюся часть. При диаметре канала $D_{cyl} = 14.5$ мм максимальная температура составляет 2670 К, при $D_{cyl} = 18.5$ мм наблюдается незначительное падение до $T_{max}=2610$ К, при расширении до $D_{cyl} = 18.5$ мм и установлении сверхзвукового режима в стабилизаторе температура падает до $T_{max}=2560$ К. Во всех случаях сохранялась качественная картина распределения изотерм и максимальная температура, наблюдавшаяся в зоне интенсивного тепловыделения, в ≈ 2 раза превосходила температуру в на оси камеры сгорания.

Заключение. Результаты расчетов горения в ПВРДТТ показывают, что характеристики течения весьма чувствительны к форме канала, в частности к площади проходного сечения цилиндрической части. При недостаточной ширине канала в стабилизаторе реализуется дозвуковой режим с высоким внутренним давлением. При увеличении проходного сечения канала течение во всей камере сгорания становится сверхзвуковым. Дальнейшие исследования будут направлены на систематическое изучение влияния геометрии, а также эффектов конечной скорости горения и устойчивости процессов горения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-29-01084.

Литература

1. Ben-Yakar, A. Investigation of a Solid Fuel Scramjet Combustor / A. Ben-Yakar, B. Natan, A. Gany // Journal of Propulsion and Power – 1998. – V. 14. – № 4. – P. 447-455.
2. Rashkovskiy, S.A. Stabilization of solid fuel combustion in a ramjet engine/ S.A. Rashkovskiy, S.E. Yakush, A.A. Baranov // Journal of Physics: Conf. Series – 2017. – Series 815. – P. 1-8.
3. Kitamura, K. Reduced dissipation AUSM-family fluxes: HR-SLAU2 and HR-AUSM+-up for high resolution unsteady flow simulations / K. Kitamura, A. Hashimoto // Computers and Fluids – 2016. – 126. – P. 41-57.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОТРУБОК РАЗЛИЧНОЙ ХИРАЛЬНОСТИ

Брюханов И.А.^{а)}, Лисовенко Д.С.^{б)}, Городцов В.А.^{б)}

^{а)} НИИ Механики МГУ

^{б)} ИПМех РАН

E-mail: ibryukhanov@gmail.com

Методом молекулярной динамики были изучены упругие характеристики металлических нанотрубок, полученных сворачиванием кристаллических пластин с ориентацией (001) материалов с кубической анизотропией при различных углах хиральности. Установлено, что трубки из меди, кобальта и железа с углами хиральности выше 30 градусов проявляются свойства ауксетичности, то есть трубки расширяются при растяжении. Показано, что при углах хиральности, отличных от 0 и 45 градусов, трубки проявляют свойство линейного эффекта Пойтинга.

Введение. Ауксетиками называются материалы, которые расширяются в поперечном сечении при растяжении. Поиск материалов, которые обладают свойствами ауксетичности, ведется на протяжении последних десятилетий. Углеродные и неуглеродные нанотрубки обладают уникальными физическими свойствами [1]. В работах [2, 3] на основе теории упругости анизотропного тела был получен результат, что трубки, свернутые из некоторых металлов, обладающих кубической симметрией, могут проявлять свойства ауксетичности [2] и линейный эффект Пойтинга [3]. Этот эффект заключается в том, что кручение стержня сопровождается его растяжением (прямой эффект), а растяжение сопровождается кручением (обратный эффект). Данная работа посвящена молекулярно-динамическому моделированию механических свойств металлических нанотрубок, полученных сворачиванием кристаллических пластин с ориентацией (001) под различными углами хиральности.

Методы. Атомные модели трубок из кобальта, алюминия, меди и железа строились в два этапа. Сначала создавалась пластина в виде параллелепипеда, ось z которого параллельна плоскости (001), а оси x и y повернуты в плоскости (001) относительно направлений (100) и (010) на угол, который равен углу хиральности. При этом толщина параллелепипеда в направлении оси z, соответствовала толщине трубки. Перед сворачиванием трубки из такого параллелепипеда, производилась его деформация, соответствующая изгибу, то есть внутренний слой оказывался в сжатом состоянии, а внешний – в растянутом. После этого производилось скручивание параллелепипеда в трубку. При этом размеры параллелепипеда подбирались таким образом, чтобы на месте стыковки двух противоположных граней выполнялись периодические граничные условия, чтобы полученная трубка не содержала дефектного шва. После того, как атомная структура трубки была получена, выполнялась процедура оптимизации энергии системы методом градиентного спуска.

Растяжение трубок производилось в квазистатическом режиме, при котором оптимизация энергии системы выполнялась на каждом шаге приложения деформации. Определялись смещения частиц в радиальном и касательном направлении в зависимости от величины продольной деформации. По смещениям вычислялась зависимость углового коэффициента Пуассона. Коэффициент Пуассона определяет направление радиального смещения атомов, если он положителен, то частицы смещаются от центра, а если отрицателен, то к центру оси трубки.

Для трубок из Al, Cu, Co, Fe использовались потенциалы взаимодействия типа погруженного атома (EAM) из работ [4, 5, 6], при параметризации которых использовались упругие свойства металлов. Длина трубок равнялась 100 нм, а величины внутреннего и внешнего радиуса 20 и 22 нм, соответственно. Молекулярно-динамические расчеты проводились в пакете LAMMPS [7].

Результаты. Было показано, что при увеличении угла хиральности от 0 до 45 градусов снижаются значения коэффициентов $\nu_{\varphi z}$. При угле 45 градусов значения коэффициента $\nu_{\varphi z}$ становится отрицательным как на внутреннем, так и на внешнем радиусе. Это означает, что при растяжении трубки атомы удаляются от ее оси вдоль всего сечения. Аналогичный результат получается и для трубок из Cu. Для нанотрубок из Co коэффициент Пуассона

может стать отрицательным только на внутреннем радиусе, на внешнем радиусе его величина положительна. Значения параметра $\nu_{\varphi z}$ для трубок из Al в наших расчетах оказывалось положительным, однако, как показано в работе [2], с увеличением отношения внешнего радиуса к внутреннему, его значение может также стать отрицательным.

Литература

1. Lee W. et al. A Template-Based Electrochemical Method for the Synthesis of Multisegmented Metallic Nanotubes. *Angewandte chemie*. – 2005. – V. 117. – №. 37. – P. 6204-6208.
2. Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С., Волков М.А. Отрицательный коэффициент Пуассона для кубических кристаллов и нано/микротрубок. *Физическая мезомеханика*. – 2013. – Т. 16. - №. 6. С.13-31.
3. Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С. Линейный эффект Пойнтинга при кручении и растяжении криволинейно-анизотропных трубок. *Доклады Академии наук*. – 2015. – Т. 464. – №. 1. – С. 35-38.
4. Apostol F., Mishin Y. Interatomic potential for the Al-Cu system. *Physical Review B*. – 2011. – V. 83. – №. 5. – P. 054116.
5. Pun G. P. P., Mishin Y. Embedded-atom potential for hcp and fcc cobalt. *Physical Review B*. – 2012. – V. 86. – №. 13. – P. 134116.
6. Chamati H. et al. Embedded-atom potential for Fe and its application to self-diffusion on Fe (1 0 0). *Surface Science*. – 2006. – V. 600. – №. 9. – P. 1793-1803.
7. Plimpton S. Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics. *Journal of computational physics*. – 1995. – V. 117. – №. 1. – P. 1-19.

ОТСЛОЕНИЕ ПОКРЫТИЯ ПРИ НАГРУЖЕНИИ

Буртасова М.В.

МАИ

Научный руководитель – доцент, д.ф.-м.н. Устинов К. Б.
МАИ, Институт №11, Кафедра физики конструкционных материалов
E-mail: marina-burtasova@mail.ru

Для задачи об отслоении покрытия от криволинейной поверхности методом конечных элементов получены зависимости коэффициентов расширенной матрицы упругой заделки от отношения упругих модулей основания и покрытия, и геометрических параметров: отношения протяженности отслоившегося участка покрытия к его толщине, и отношения толщины покрытия к радиусу кривизны основания.

Работа посвящена исследованию механических свойств термозащитных покрытий. Под действием циклически меняющихся температур в них возникают остаточные напряжения, обусловленные, различием процессов релаксации в покрытии и подложки, которые могут приводить к нарушению адгезионного контакта на границе раздела и, как следствие, отслоению покрытия.

При моделировании развития отслоений обычно отслоившийся слой рассматривают как защемленную по краям пластину [1-4]. В случае основания прямолинейной формы для описания деформирования пластины обычно используют теорию Кармана. При этом особое внимание уделяется постановке граничных условий, записываемых в виде упругой заделки – пропорциональности угла поворота и тангенциального смещения в точке закрепления действующему моменту и продольному усилию, действующих в данной точке [4-6]. Для оснований, имеющих кривизну, используют теорию слабо искривленных пластин Донелла-Муштари-Власова [3, 7, 8]. Граничные условия, записываются в наиболее общем случае в виде обобщенной упругой заделки – пропорциональности угла поворота v'_0 и компонент вектора смещения (u_0, v_0) в точке закрепления действующему моменту M и главному вектору (T, N) усилий, действующих в данной точке. Связь кинематических и силовых параметров осуществляется с помощью расширенной матрицы (3×3) коэффициентов податливости [2-4]

$$E \begin{pmatrix} u_0 \\ v'_0 \\ v_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{uT} & K_{uM} & K_{uN} \\ K_{vT} & K_{vM} & K_{vN} \\ K_{vT} & K_{vM} & K_{vN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T \\ M + lN \\ N \end{pmatrix} \quad (1)$$

Здесь l - длина отслоившегося покрытия, E - модифицированный для условий плоской деформации упругий модуль материала покрытия.

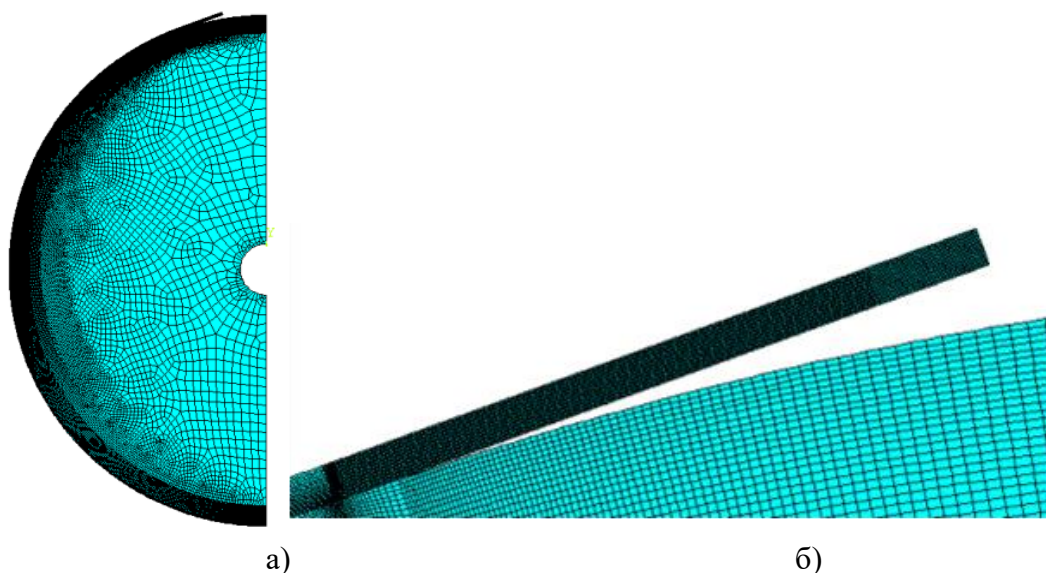


Рис. 1 Конечноэлементная сетка; общий вид (а), детализация вблизи отслоения (б)

В настоящей работе исследовалось отслоение от цилиндрического основания в двумерной постановке. Методом конечных элементов найдены коэффициенты упругой заделки в зависимости от параметров: отношения модулей покрытия и основания, отношения толщины покрытия к протяженности отслоения, отношения толщины покрытия к радиусу кривизны. Конечноэлементная сетка (общий вид и детализация вблизи отслоения) представлены на рис. 1)

Для получения интересных коэффициентов податливости были решены задачи для трех вариантов приложения нагрузки (Рис 2): момента M , растягивающей T и перерезывающей N силы (в этом случае также прикладывался изгибающий момент, компенсирующий момент, создаваемый силой).

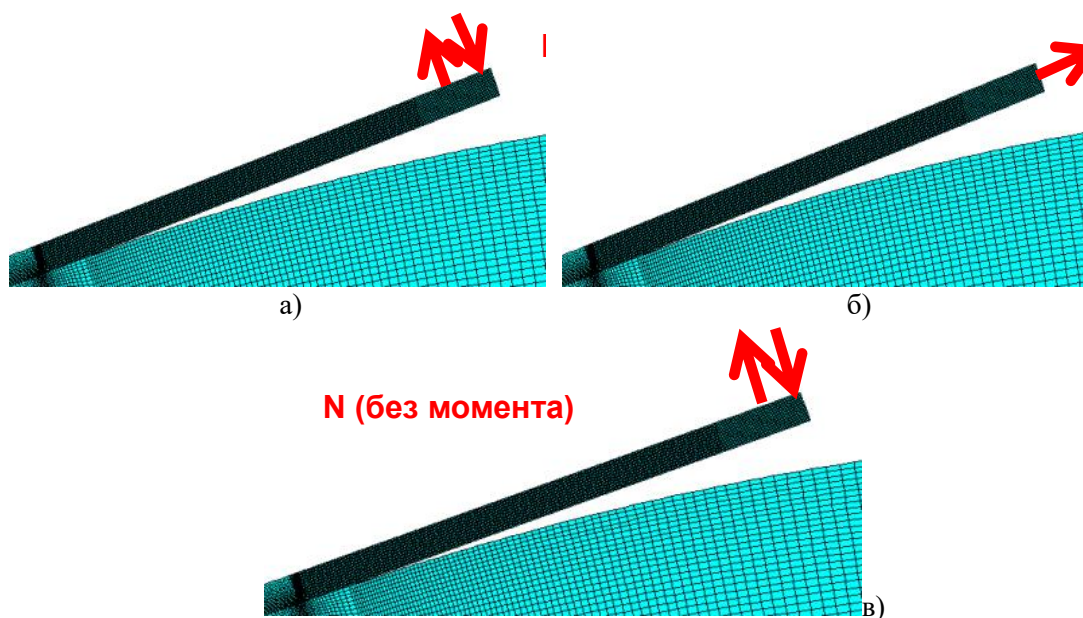


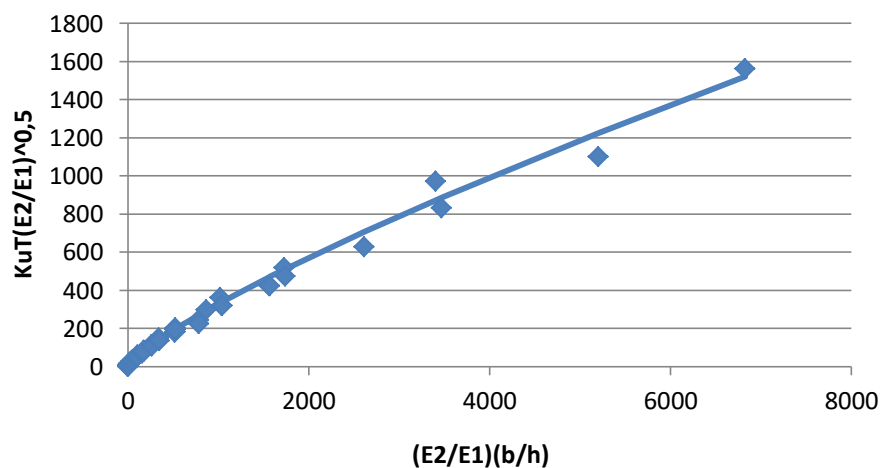
Рис. 2. Приложение нагрузки; момент (а); растягивающая сила (б); перерезывающая сила (в).

Для полученных значений построены аппроксимирующие зависимости (Рис 3). Проведено сравнение с существующими решениями. При уменьшении отношения протяженности отслоения к радиусу кривизны полученные зависимости, как и следовало ожидать, переходят в зависимости для плоских оснований [3, 4].

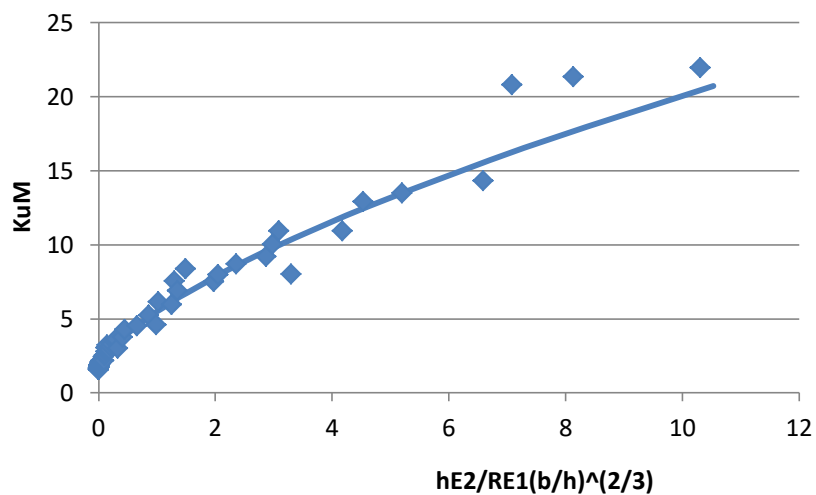
Литература

1. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Отслоение покрытий под действием термоупругих напряжений. (Балочное приближение)// Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия. - 2007. -№4(54).-С. 66-83.
2. Устинов К.Б. О расслоении полосы по границе раздела упругих свойств. Часть 1. Постановка задачи, случай нормального отрыва// Вестник ПНИПУ. Механика. -2015.- №4.-С.226-245.
3. Устинов К.Б., Каспарова Е.А. Оценка влияния кривизны и податливости основания на параметры отслоения покрытия // Деформация и разрушения материалов. – 2015.- №3.- С. 28-35.
4. Устинов К.Б. Об отслоении слоя от полуплоскости; условия упругой заделки для пластины, эквивалентной слою // Изв. РАН. МТТ. – 2015. – № 1. – С. 75-95
5. Yu H.-H., Hutchinson J.W. Influence of substrate compliance on buckling delamination of thin films // Int. J. Fract. 2002. V. 113. P. 39-55.
6. Ustinov K.B. On influence of substrate compliance on delamination and buckling of coatings // Eng. Failure Analysis. 2015. V. 47B. P. 338–344.
7. Hutchinson J.W. Delamination of compressed films on curved substrates // J. Mech. Phys. Solids. 2001. V. 50. P. 1847-1864.

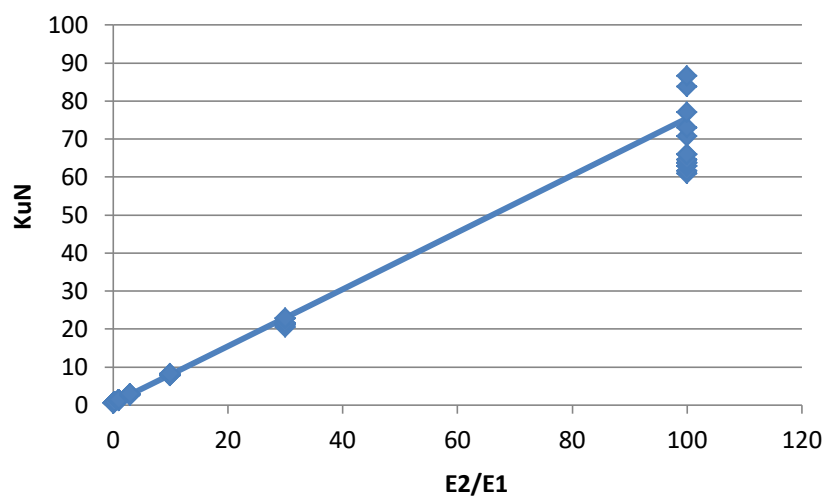
8. Гольдштейн Р.В., Устинов К.Б. Некоторые аспекты развития отслоений анизотропных и многослойных покрытий, в том числе при наличии промежуточного слоя Препринт ИПМех РАН. 2016. №11111. 20 с.



а)



б)



в)

Рис. 3. Коэффициенты податливости: KuT (а); KuM (б); KuN (в).

РАСЧЕТ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПОСАДКИ КОЛЕЦ

Бухалов В. И.

Научный руководитель — профессор, д.ф.-м.н. Попов А. Л.
МАИ, Институт №11, Кафедра физики конструкционных материалов
E-mail: vlad.buhalov@yandex.ru

При изучении нагруженных металлических образцов наиболее важным являются окрестности возле отверстий, поскольку на границах отверстий могут возникнуть напряжения, достигающие предела текучести. Одним из типов такого нагружения является посадка двух цилиндров с натягом. Ранее задача о посадке цилиндров рассматривалась в упругой постановке [1].

В докладе представлено решение задачи о посадке двух цилиндрических колец с натягом в упругопластической постановке. Рассматривались два кольца: внутреннее – из ст. 20 с пределом текучести 250 МПа, наружное – из закаленной ст. 40 с пределом текучести около 700 МПа. Посадка осуществлялась с натягом, обеспечивающем во внутреннем теле без отверстия напряжение равное $0.9\sigma_y$. При создании во внутреннем теле центрального отверстия напряжения в нем за счет эффекта концентрации в зоне вблизи отверстия достигали предела текучести.

Для расчета НДС в этом случае потребовалось рассмотрение трех областей: 1) между внутренним отверстием и заранее неизвестной круговой границей пластической зоны, 2) между границей пластической зоны и внешней границей внутреннего кольца, 3) наружного кольца. Сложность задачи по сравнению упругопластической задачей Ламе, которая решена, например, в [2], состояла в том, что контактное давление при создании отверстия становилось неизвестным, наряду с радиусом пластической зоны.

Для определения неизвестных была в общем виде решена упругопластическая задача Ламе при некотором давлении на наружном контуре внутреннего кольца. Затем выписаны выражения для радиальных перемещений обоих цилиндров на границе их контакта. Эти выражения были приравнены величине радиального натяга, который остался неизменным при создании центрального отверстия. В результате было получено недостающее уравнение для определения контактного давления.

Конкретный расчет для соотношения размеров: радиус отверстия 1.5 мм, радиус внутреннего кольца 10 мм, радиус наружного кольца 25 мм показал, что радиус пластической зоны сократился с 4.3 мм (для упругопластической задачи Ламе) до 3.6 мм, а контактное давление снизилось до $0.87\sigma_y$.

Таким образом, построенное решение задачи об упругопластической посадке колец позволяет уточнить известные результаты решения такой задачи в упругой области.

Литература

1. Гадолин А.В. Теория орудий, скрепленных обручами // Артилл. журн. 1861. - №12. – с. 1033-1071.
2. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. - М.: Машиностроение, 1975. - 400 с.

МАСШТАБНЫЕ ЭФФЕКТЫ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КРУГЛОМ ДИСКЕ С ОТВЕРСТИЕМ ПРИ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ СТАЦИОНАРНОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ В РАМКАХ МИКРОДИЛАТАЦИОННОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Волков А. В.

Научный руководитель – к.ф.-м.н. Соляев Ю. О.

ИПРИМ РАН, Лаборатория неклассических моделей композитных материалов
и конструкций

E-mail: volkov.9291@mail.ru

В докладе рассмотрено решение задачи нахождения температурных напряжений в круглом диске с отверстием при осесимметричном стационарном температурном поле в рамках микродилатационной теории упругости (теории упругости с порами). Теория описывает материалы с однородно распределёнными по объёму порами. Когда объём пор падает до нуля, теория сводится к линейной теории упругости. Основной новой чертой теории является введение дополнительной независимой кинематической переменной: объёмного содержания пористости. Помимо параметров Ламе появляются три дополнительных неклассических физических параметра. Микродилатационная теория упругости предсказывает появление масштабных эффектов при различных случаях нагружения. Так, например, масштабные эффекты возникают для задачи чистого изгиба в рамках микродилатационной теории упругости. Существует множество материалов, для которых можно ожидать появления эффектов, предсказанных теорией (пенометаллы, пористые и волокнистые керамики и др.). Однако до сих пор существует мало экспериментов, пытающихся выявить неклассические эффекты, возникающие в теории. В докладе представлено аналитическое и численное решение задачи термоупругости с микродилатацией для круглого диска с отверстием. Для численного решения использован метод конечных элементов. Конечноэлементное решение может быть использовано для предсказания результатов экспериментов необходимых для нахождения неклассических параметров теории. Численное решение построено с помощью программы конечноэлементного моделирования Comsol. Изучены масштабные эффекты, возникающие в рамках теории упругости с микродилатацией (теории упругости с порами). Проведено сравнение решений в рамках классической и микродилатационной теории упругости.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ МОДУЛЯ ЮНГА И КОЭФФИЦИЕНТОВ ПУАССОНА ЦИЛИНДРИЧЕСКИ-АНИЗОТРОПНЫХ ХИРАЛЬНЫХ ТРУБОК ИЗ МОНОКЛИННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Волков М.А., Городцов В.А., Лисовенко Д.С.

ИПМех РАН

E-mail: volkovmikh@gmail.com

Решена задача радиально неоднородного растяжения цилиндрически-анизотропных хиральных трубок из моноклинных кристаллов. С использованием экспериментальных данных исследована изменчивость модуля Юнга и коэффициентов Пуассона таких трубок. Выявлены ауксетические трубки – трубки, коэффициенты Пуассона которых принимают отрицательные значения. Показано, что у некоторых трубок модуль Юнга и коэффициенты Пуассона могут сильно зависеть от хиральности и отношения радиусов трубки.

Введение. Коэффициент Пуассона является характеристикой деформации материала в поперечном направлении по отношению к деформации в продольном. Для изотропных материалов он ограничен между -1 до 0.5 [1], а для анизотропных материалов таких строгих ограничений не существует. Пока квадратичная форма энергии деформирования таких материалов является положительно определенной, их коэффициент Пуассона может принимать сколь угодно большие значения, в том числе и отрицательные [2]. Долгое время предполагалось, что у реальных материалов коэффициент Пуассона может быть только положительным, однако это не так. В настоящее время подробно исследована изменчивость коэффициента Пуассона у прямолинейно-анизотропных кристаллов различных систем [3-7] и установлено, что довольно большое их число являются ауксетиками. Для описания многослойных нанотрубок в рамках теории упругости может применена модель цилиндрически-анизотропного полого стержня [8]. Данная модель использована в работах [9-11], где для трубок из гексагональных, кубических и орторомбических кристаллов показано, что их коэффициенты Пуассона (характеризующие деформацию в радиальном и угловом направлениях) могут принимать отрицательные значения.

Растяжение цилиндрически-анизотропных хиральных трубок из моноклинных кристаллов. В работе рассмотрены трубки, полученные в результате сворачивания кристаллических пластин. Возможность получения трубок таким способом продемонстрирована в [12-14]. Предполагается, что направления кристаллографических осей в пластине могут не совпадать с ребрами и могут быть повернуты в плоскости на угол α (Рис. 1). Трубки, полученные в результате сворачивания таких пластин, являются хиральными.

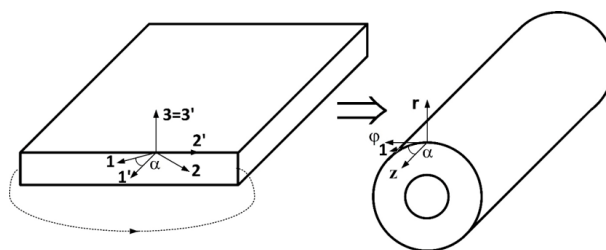


Рис. 1 Сворачивание прямолинейно-анизотропной пластины в цилиндрически-анизотропную трубку

Рассмотрена задача растяжения цилиндрически-анизотропных хиральных трубок из моноклинных кристаллов, поверхности которых свободны от напряжения, а на торцах отсутствует крутящий момент. Для решения использован полуобратный метод Сен-Венана. На достаточном удалении от торцов можно пренебречь зависимостью от продольной координаты, за счет симметрии граничных условий можно пренебречь зависимостью от угловой координаты. Напряженно-деформированное состояние, возникающее в трубке, считаем радиально-неоднородным. Решение задачи и полученные зависимости модуля Юнга E и коэффициентов Пуассона ν_{rz} и $\nu_{\varphi z}$ (характеризующие деформации в радиальном и угловом направлениях по отношению к продольной, соответственно) от упругих

постоянных кристалла, отношения радиусов трубки ρ , угла хиральности α и радиальной координаты. Они полностью совпадают с таковыми для хиральных трубок из орторомбических кристаллов и представлены в [11].

В результате анализа изменчивости данных выражений, выполненного на основании экспериментальных данных из справочника [15], выявлены трубки обладающие наибольшей изменчивостью коэффициентов Пуассона и модуля Юнга. К числу таких трубок относится трубка из кристалла $\beta\text{-F}_6\text{H}_4\text{F}_6$. Зависимость её модуля Юнга от угла хиральности α и параметра толщины ρ (равного отношению внешнего радиуса трубки к внутреннему) представлена на Рис. 2.

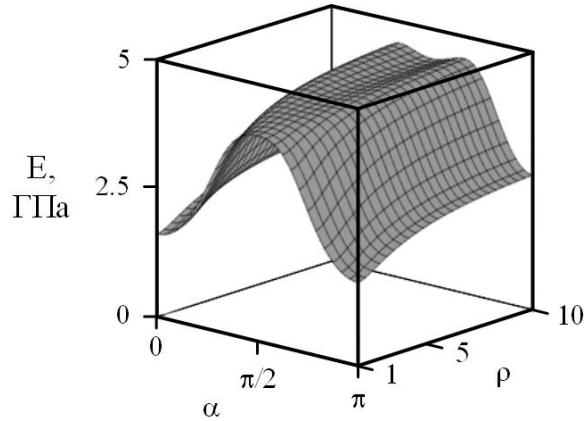
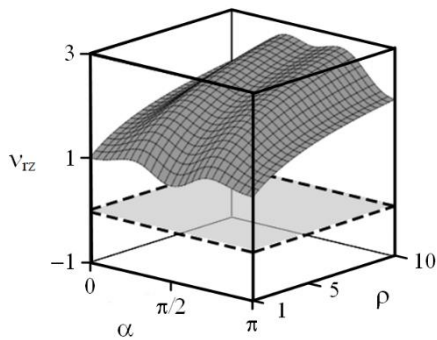
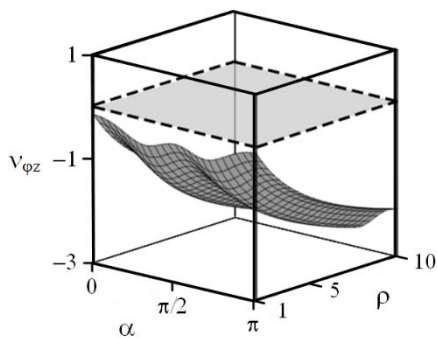


Рис. 2 Модуль Юнга трубки из моноклинного кристалла $\beta\text{-F}_6\text{H}_4\text{F}_6$

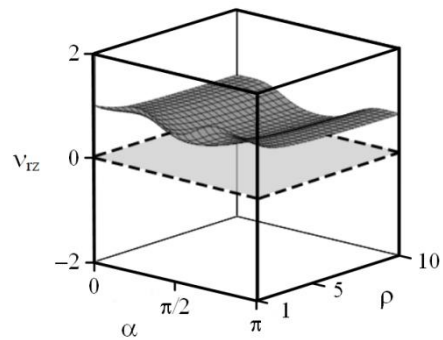
(а)



(в)



(б)



(г)

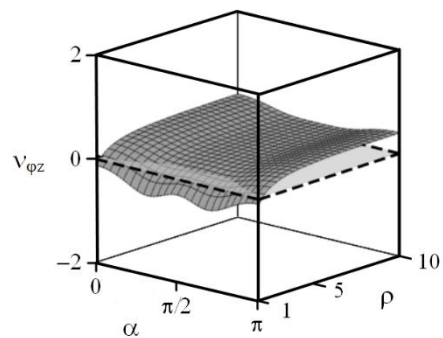


Рис.3 Коэффициенты Пуассона трубки из моноклинного кристалла $\beta\text{-F}_6\text{H}_4\text{F}_6$ на внутренней (а,в) и внешней (б,г) поверхностях

В пределах $1.01 \leq \rho \leq 10$ и $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ минимальная величина модуля Юнга равна 1.62 ГПа при

$\alpha = 0$ и $\rho = 1.01$, а максимальная – 4.58 ГПа при $\alpha = 0.34\pi$ и $\rho = 10.0$. Таким образом, модуль Юнга такой трубки может увеличиваться практически в 3 раза за счет изменения её структуры. Коэффициенты Пуассона цилиндрически-анизотропных трубок из моноклинных кристаллов зависят от радиальной координаты, и было изучено их поведение для двух частных случаев: на внутренней и на внешней поверхностях. Поведение коэффициентов Пуассона ν_{rz} и $\nu_{\varphi z}$ на внутренней и внешней поверхностях трубки из $\beta\text{-F}_6\text{H}_4\text{F}_6$ показано на Рис. 3. Наибольшей изменчивостью характеризуются коэффициенты Пуассона на внутренней поверхности. Так, радиальный коэффициент Пуассона ν_{rz} с изменением отношения радиусов трубки ρ возрастает практически в 3 раза при $\alpha = 0.35\pi$. Угловой коэффициент Пуассона $\nu_{\varphi z}$ на внутренней поверхности убывает с -0.14 до -2.66. На внешней поверхности и радиальный и угловой коэффициенты Пуассона меняются в меньшей степени. При этом, угловой коэффициент Пуассона является отрицательным по всей толщине трубки при малых значениях отношения толщин и в широком диапазоне угла хиральности.

Работа выполнена в рамках Государственного задания АААА-А17-117021310373-3.

Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика Т.7. М: Физматлит, 2003, 264с
2. Ting T.C.T., Chen T. Poisson's ratio for anisotropic elastic materials can have no bounds // Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2003, V.58, P.73-82
3. Goldstein R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S. Classification of cubic auxetic // Physica Status Solidi B, 2013, V.250, P.2038-2043.
4. Lethbridge Z.A.D., Walton R.I., Marmier A.S.H., Smith C.W., Evans K.E. Elastic anisotropy and extreme Poisson's ratios in single crystals // Acta Materiala, 2010, V.58, P.6444-6451.
5. Goldstein R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S., Volkov M.A. Auxetics among 6-constant tetragonal crystals // Письма о материалах, 2015, Т.5, Вып.4, С.409-413.
6. Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С., Волков М.А. Механические характеристики 7-ми константных ромбоэдрических кристаллов и нано/микротрубок из них // Письма о материалах, 2016, Т.6, Вып.2, С.93-97.
7. Волков М.А. Экстремальные значения коэффициента Пуассона триклинных и моноклинных кристаллов // Письма о материалах, 2014, Т.3, Вып.4, С.167-170.
8. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. М: Наука, 1977, 416с.
9. Goldstein R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S. To the description of multi-layered nanotubes in models of cylindrically anisotropic elasticity // Physical Mesomechanics, 2010, V.13, P.12-20.
10. Goldstein R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S., Volkov M.A. Negative Poisson's ratio for cubic crystals and nano/microtubes // Physical Mesomechanics, 2014, V.17, P.97-115.
11. Goldstein R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S., Volkov M.A. Auxeticity in nano/microtubes produced from orthorhombic crystals // Smart Materials and Structures, 2016, V.25, N.5, P.054006.
12. Prinz V.Ya., Seleznev V.A., Samoylov V.A., Gutakovsky A.K. Nanoscale engineering using controllable formation of ultra-thin cracks in heterostructures // Microelectronic Engineering, 1996, V.30, P.439-442.
13. Schmidt O.G., Eberl K. Nanotechnology. Thin solid films roll up into nanotubes // Nature, 2001, V.410, P.168.
14. Schmidt O.G., Schmarje N., Deneke C., Müller C., Jin-Philip N.-Y. Three-dimensional nanoobjects evolving from a two-dimensional layer technology // Advanced Materials, 2001, V.10, P.756-759.
15. Landolt-Börnstein. Group III: Crystal and Solid State Physics. 29a. Second and Higher Order Constants. Berlin. Springer (1992)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛН ПОХГАММЕРА – КРИ В ЗАДАЧАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ДИАГНОСТИКИ

Гаджибеков Т.А., Кузнецов С.В.

Научный руководитель — профессор, д.ф.-м.н. Кузнецов С.В.
МГТУ им. Н. Э. Баумана, Факультет Фундаментальные науки, Кафедра Прикладная математика
E-mail: 90-region@mail.ru

Анализируются теоретические аспекты применения акустических волн Похгаммера – Кри в неразрушающей диагностике. Основное внимание уделяется продольным аксиально симметричным гармоническим модам. Впервые дается анализ дисперсионных кривых для стержней, выполненных из аустенитов (материалов с отрицательным коэффициентом Пуассона).

Продольные аксиально симметричные волны Похгаммера – Кри часто применяются в качестве метода как для неразрушающего определения механических свойств материалов, так и для диагностики наличия дефектов.

В случае неразрушающего определения механических свойств материалов, как правило, используют два цилиндрических длинных стержня Гопкинсона (называемых иногда стержнями Кольского), между которыми размещают исследуемый образец, как правило, также цилиндрической формы.

При ударном воздействии, приложенном к левому торцу первого стержня Гопкинсона, распространяется импульс со скоростью близкой к второй предельной скорости, далее на интерфейсной границе между первым стержнем и образцом часть энергии, переходит в образец, а часть отражается. На следующей границе между образцом и вторым стержнем Гопкинсона происходит аналогичное явление. Было установлено, что в случае длиннопериодных импульсов, приложенных к одному из торцов стержня Гопкинсона, низкочастотные составляющие фундаментальной моды, распространяющиеся с большей скоростью, имеют и большие амплитуды. Известны обобщения на случай применения стержней Гопкинсона для экспериментальных исследований, связанных с возбуждением и распространением крутильных мод волн Похгаммера – Кри.

Задачи обнаружения дефектов в трубах и слоистых коаксиальных цилиндрах также основаны на генерировании в основном продольных аксиально симметричных волн Похгаммера – Кри и исследовании либо их отражения от локализованных дефектов, либо изменения их дисперсионных кривых при распространении по участкам с измененными свойствами. При неразрушающем контроле дефектных зон в стержнях и трубах, как правило, используют источники, возбуждающие гармонические волны Похгаммера – Кри. Это необходимо для возможности сопоставления теоретических дисперсионных кривых с полученными в ходе экспериментальных исследований.

В настоящей работе по дисперсионному уравнению осуществляется построение дисперсионных кривых для нижней (фундаментальной) аксиально симметричной моды волн Похгаммера – Кри, распространяющихся в цилиндрическом стержне.

Рассматривается два основных случая: (1) вариация коэффициента Пуассона и (2) вариация модуля упругости материала стержня, получены следующие результаты:

1. Вариация коэффициента Пуассона. Результат изменения относительного значения первой предельной скорости, при вариации коэффициента Пуассона показывает, что в области высоких частот фазовая скорость является информативной для определения коэффициента Пуассона материала.

2. Вариация модуля упругости. Обнаружено, что в окрестности второй предельной скорости исследуемые дисперсионные кривые являются информативными для определения модуля упругости материала.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТВЕРДОФАЗНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЛИТОГО СПЛАВА ВКНА-25 С ДЕФОРМИРУЕМЫМ ЭП975 ПРИ СВАРКЕ ДАВЛЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Галиева Э.В.¹, Ахунова А.Х.¹

Научный руководитель – д.т.н., профессор Поварова К.Б.²

¹ ИПСМ РАН

² ИМЕТ РАН

E-mail: galieva_elvina_v@mail.ru

В работе показано, что при сварке давлением в условиях сверхпластичности сплава ЭП975 деформация локализуется в никелевом сплаве ЭП975 и распределяется равномерно по всему объему, в то время как интерметаллидный сплав ВКНА-25 в монокристаллическом состоянии испытывает минимальную деформацию не превышающую 0,2%. По результатам сравнительного анализа физического и конечно-элементного моделирования, установлено, что возникновение рафт-структуры в околошовной зоне соединяемого интерметаллидного сплава ВКНА-25 обусловлено активизацией диффузионных процессов, в том числе коагуляции и ориентированного роста частиц упрочняющей фазы в условиях приложенного напряженно-деформированного состояния

Введение. Известно [1], что детали газотурбинного двигателя, такие как диски и лопатки, а также биметаллические детали типа «Блиск» работают в различных температурных условиях, что обуславливает выбор различных материалов для обеспечения требуемого комплекса их эксплуатационных свойств. Перспективным методом решения проблемы получения качественной неразъемной конструкции – блиска является метод сварки давлением в условиях сверхпластичности разнородных сплавов на основе никеля [2].

Целью работы является исследование взаимосвязи напряженно-деформированного состояния и особенностей изменения микроструктуры и фазового состава в зоне твердофазного соединения литого интерметаллидного сплава ВКНА-25 с деформируемым ультрамелкозернистым сплавом ЭП975.

Материал и методики. В работе проведен сравнительный анализ результатов конечно-элементного моделирования (КЭМ) сварки давлением с образцов из жаропрочного никелевого сплава ЭП975 и интерметаллидного на основе Ni_3Al с экспериментальными данными. Сварка давлением образцов диаметром 15 мм и высотой 15 мм (ВКНА-25) и 20 мм (ЭП975) осуществлялась по схеме одноосного сжатия в условиях сверхпластичности сплава ЭП975 с мелкозернистой структурой (3-8 мкм), при температуре 1125°C и начальной скорости деформации 10^{-4}с^{-1} , степень деформации ЭП975 $\epsilon = 30\%$. Для анализа методом КЭМ экспериментальные данные по одноосному сжатию двух рассмотренных материалов при температуре сварки вводились в систему DEFORM-2D для задания определяющих соотношений. Рассмотрено влияние степени деформации на напряженно-деформированное состояние материала при образовании твердофазного соединения между образцами.

Результаты и обсуждения. По результатам металлографических исследований установлено, что практически вся деформация, как и ожидалось, локализуется в образцах сплава ЭП975, тогда как деформация интерметаллидного сплава ВКНА-25 не превышает 0,2 % [2]. Структура соединяемого сплава ЭП975 вдали от шва и в околошовной зоне не изменяется. Благодаря развитию механизмов сверхпластической деформации при сжатии ЭП975 ($\epsilon \sim 30\%$) деформация распределена равномерно по всему объему образца. Размер и морфология зерен γ' и γ фаз, характерных для дуплексной структуры исходного материала, практически не изменились по сравнению с исходным состоянием. Различия в строении монокристаллов сплава ВКНА-25 вдали от шва и в околошовной зоне позволяют заключить, что в монокристаллах деформация сжатием локализована в зоне, непосредственно примыкающей к сварному шву на глубину 3-5 мкм, где формируется некое подобие рафт-структуры, образующейся в этом сплаве при растяжении в условиях высоких температур: в $\gamma'+\gamma$ дендритах участки γ' и γ фаз укрупняются, сливаются и располагаются перпендикулярно приложенному напряжению сжатия, межфазные границы γ'/γ в околошовной зоне становятся извилистыми в отличие от прямых границ в исходном

материале и вдали от шва [2].

Результаты конечно-элементного моделирования позволяют объяснить возникновение в околошовной зоне сварного соединения со стороны сплава ВКНА-25 рафт-структуры. Показано, что несмотря на то, что соединяемый образец из сплава ВКНА-25 испытывает минимальную деформацию в нем при сварке давлением возникает напряженно-деформированное состояние, характеризующееся возникновением упругопластических и сдвиговых деформаций. Вследствие этого в сплаве ВКНА-25 в околошовной зоне в условиях воздействия высокой температуры (1125°C) деформации, ускоряются диффузионные процессы, в том числе процессы коагуляции упрочняющей γ' -фазы, протекающие под воздействием приложенного напряженно-деформированного состояния. По-видимому, вышеописанные процессы приводят к формированию рафт-структуры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-38-50060 «мол_нр».

Литература

1. Логунов А.В., Шмотин Ю.Н. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин. М.: ООО «Наука и технология», 2013. 256 с.
2. Поварова К.Б., Валитов В.А., Дроздов А.А., Базылева О.А., Галиева Э.В., Аргинбаева Э.Г. Формирование градиентных структур в зоне соединения деформируемого никелевого и монокристаллического интерметаллидного сплава при термодиффузионной сварке давлением и термической обработке. // Металлы. 2018. №1. С. 48-57.

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ЗАДАЧИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ТРУБЫ ПО ЖЕСТКОМУ ВОЛОКНУ

Гандилян Д.В.^{1,2)}, Идрисов Д.М.¹⁾

Научный руководитель – доцент, к.ф.-м.н. Лямина Е.А.

¹⁾ ИПМех РАН, ²⁾ МГТУ им. Н.Э. Баумана

E-mail: david.ghandilyan@mail.ru

В настоящей работе применен метод характеристик для осесимметричной задачи о пластическом течении трубы по жесткому волокну. Проведено сравнение численных и аналитических решений поля напряжений и скоростей. Определен коэффициент интенсивности скорости деформации вблизи поверхности трения.

Во многих процессах обработки металлов резанием и давлением вблизи поверхностей с высокими удельными силами трения формируется тонкий слой, микроструктура в котором значительно отличается от микроструктуры в основном объеме материала. Коэффициент интенсивности скорости деформации, введенный для жесткопластических моделей, является коэффициентом перед сингулярным членом при разложении эквивалентной скорости деформации вблизи поверхности максимального трения и таким образом контролирует величину эквивалентной скорости деформации. С другой стороны, эквивалентная скорость деформации определяет эволюцию структуры около поверхности контакта, что согласуется с экспериментальными данными, которые показывают, что узкий слой с измененной микроструктурой часто возникает вблизи поверхности трения в процессах обработки. Для использования коэффициента интенсивности деформации в описании поведения материала, необходимо разработать эффективный численный метод расчета коэффициента интенсивности деформации. В [1, 2] предложены модели для описания развития ультрамелкозернистого слоя вблизи поверхности трения на основе коэффициента интенсивности деформации. Для применения этих моделей, необходимо разработать точный метод расчета коэффициента интенсивности деформации. Современные коммерческие пакеты конечных элементов не могут быть применены для вычисления коэффициента интенсивности деформации, поскольку поле вблизи поверхности максимального трения является сингулярным для жесткопластических моделей.

Численный подход для расчета коэффициента интенсивности деформации, основанный на методе характеристик, предложен в [3]. Для случая осесимметричных течений, коэффициент интенсивности скорости деформации определен в [4]. Однако сравнение численного решения плоской деформации, полученного в [3], и соответствующее приближенное аналитическое решение для осесимметричной задачи демонстрирует, что точность аналитического решения недостаточна для практического применения. Поэтому необходим эффективный численный метод расчета коэффициента интенсивности деформации при осесимметричном течении. Для моделей, включающих критерий текучести Треска, такой метод может быть основан на методе характеристик и может рассматриваться как продолжение метода, разработанного в [3].

В настоящей работе, применен метод характеристик для осесимметричной задачи о пластическом течении трубы по жесткому волокну. Проведено сравнение численных и аналитических решений поля напряжений и скоростей. С помощью предложенного в [5] метода определен коэффициент интенсивности скорости деформации вблизи поверхности трения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-51-540003.

Литература

1. Goldstein R.V., Alexandrov S.E. (2015) An Approach to Prediction of Microstructure Formation Near Friction Surfaces at Large Plastic Strains, *Phys. Mesomech.*, 18, 223-227.
2. Alexandrov S.E., Goldstein R.V. (2015) On Constructing Constitutive Equations in Metal Thin Layer near Friction Surfaces in Material Forming Processes, *Dokl. Phys.*, 60, 39-41.
3. Alexandrov S., Kuo C.-Y., Jeng Y.-R. (2015) A Numerical Method for Determining the Strain Rate Intensity Factor Under Plane Strain Conditions, *Cont. Mech. Therm.*, 28, 977-992.

4. Lyamina E., Nguyen T. (2016) Effect of the Yield Criterion on the Strain Rate and Plastic Work Rate Intensity Factors in Axisymmetric Flow, Struct. Eng. Mech. 58, 719-729.
5. Nguyen T., Nguyen K., Alexandrov S. (2017) A Numerical Solution for the Axisymmetric Flow of a Plastic Tube on a Rigid Fibre, J. Phys.: Conf. Ser. 885 012018.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ СТРУКТУРЫ МЕЖЗЕРЕННЫХ ГРАНИЦ

Герасимов Р.М.

Научный руководитель – доцент, к.ф.-м.н. Волегов П.С.

ПНИПУ, Кафедра ММСР

E-mail: romagrizly@gmail.com

Разработана математическая модель, описывающая процесс формирования межзеренной границы в ходе процесса кристаллизации с использованием метода молекулярной динамики. Для полученных границ зерен проведен анализ дефектной структуры и энергии при различных разориентировках зерен.

Совершенствование технологий создания материалов, представляющих собой металлы и их сплавы, ставит в настоящее время множество новых вопросов, касающихся точного описания внутреннего строения этих материалов, а также способов анализа этого строения в процессе изготовления и при эксплуатации. Одной из наиболее важных проблем при создании моделей металлических материалов является описание структуры и свойств межзеренных границ, которые представляют собой переходную область между соседними зернами, кристаллические решетки которых имеют различную пространственную ориентацию по отношению друг к другу [1]. Стоит отметить, что на сегодняшний день не существует единой теории, способной описать структуру и эволюцию структуры межзеренных границ в ходе какого-либо технологического процесса, что ставит под вопрос применимость используемых моделей материалов, в особенности – основанных на физических теориях пластичности.

В ходе работы построена и численно реализована математическая модель, описывающая процесс формирования межзеренной границы между двумя соседними зернами поликристалла в ходе процесса двусторонней кристаллизации. Для построения модели был использован молекулярно-динамический подход, который хорошо подходит для теоретического исследования состояния и эволюции структуры исследуемого материала на уровне наномасштабов, хотя и не позволяет создавать модели реальных технологических процессов [2]. Определяющим фактором при изучении свойств конкретного материала с использованием метода молекулярной динамики является выбор потенциала межатомного взаимодействия, который описывает энергию взаимодействия частиц (атомов) в зависимости от расстояния между ними, типов связи и т.д. Для металлов и сплавов на их основе в последнее время широко используются потенциалы, построенные с помощью модели погруженного атома (EAM – *embedded atom model*) [3]. Выбор EAM в работе обусловлен достаточно прозрачным с точки зрения физики алгоритмом построения, а также хорошим согласованием с результатами экспериментальных исследований.

Построенная в ходе работы модель была использована для проведения ряда численных экспериментов по описанию процесса двусторонней кристаллизации меди. В качестве начальной конфигурации рассматривались два соседних зерна, кристаллические решетки которых были разориентированы друг относительно друга на некоторый угол, а также некоторая «прослойка» между ними, имеющая структуру расплава. Начальная температура системы (под которой в рамках работы понимается мера средней кинетической энергии атомов) задана при помощи распределения Максвелла и составляла 1400 К. Кроме того, осуществлен поиск термодинамически устойчивой конфигурации системы атомов путем поддержания постоянной температуры (термостатирования). Граничные условия по двум из направлений являлись периодическими, а в третьем направлении (совпадающим с нормалью к границе зерна) являлись свободными. Это было сделано для возможного учета теплового расширения (сжатия) в ходе процесса кристаллизации. Отвод энергии в ходе расчета осуществлялся с уже кристаллизовавшейся части расчетной области.

Исходя из того факта, что молекулярно-динамический подход не позволяет рассматривать времена, сравнимые с характерными временами реальных технологических процессов, по завершению численного эксперимента по двусторонней кристаллизации возникает ряд вопросов, связанных с устойчивостью конфигураций межзеренных границ. Предполагается, что структура границы с течением некоторого времени может значительно

измениться в ходе процесса релаксации. Для этого в работе был использован метод имитации отжига [4], представляющий собой алгоритмический метод решения задачи оптимизации. В данном случае речь идет об оптимизации потенциальной энергии системы, так как об устойчивости полученной конфигурации моно судить по минимуму потенциальной энергии атомной системы. На рис. 1 представлена визуализация расчетной области до минимизации потенциальной энергии (слева), а также после минимизации (справа).

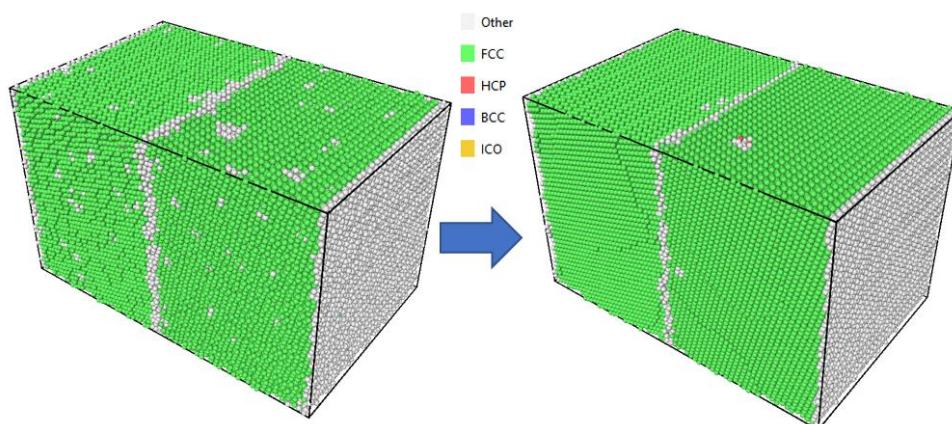


Рис. 1. Визуализация расчетной области до минимизации потенциальной энергии (слева) и после (справа) с использованием алгоритма CNA

Полученные в ходе расчетов конфигурации межзеренных границ были исследованы с помощью различных методов структурного анализа, основанных на введении некоторой меры локального беспорядка вокруг каждой частицы (либо группы частиц). Показано, что использование таких методов, как параметр центральной симметрии (CSP – *central symmetry parameter*) [5], анализ общего соседства (CNA – *common neighborhood analysis*) [6] и др. позволяют достаточно точно выделить межзеренную границу, а также оценить ее структуру. На рис. 2. представлена визуализация расчетной области до процесса кристаллизации (слева) и после (справа) с использованием алгоритма CSP, что позволяет судить об изменениях, произошедших в ходе процесса двусторонней кристаллизации.

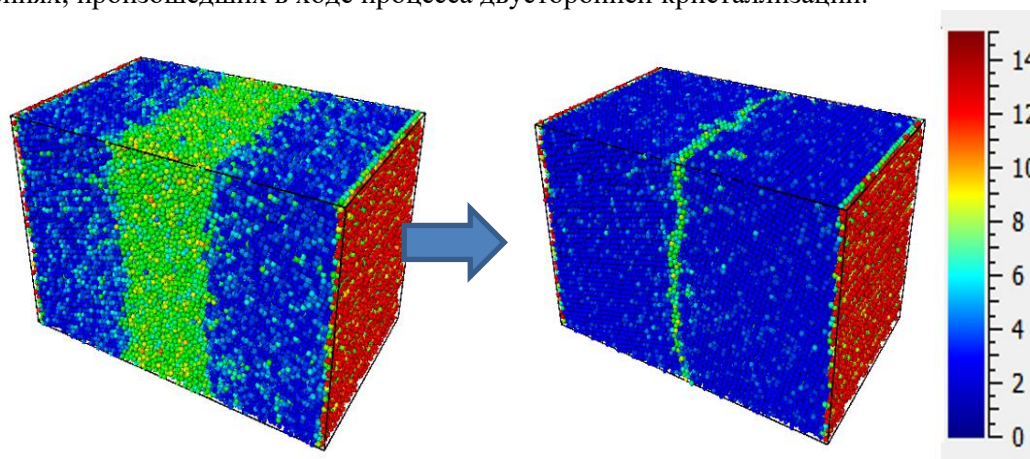


Рис. 2. Визуализация расчетной области до процесса кристаллизации (слева) и после (справа) с использованием алгоритма CSP

Кроме того, для анализа расчетной области использовалась оценка потенциальной энергии системы. На рис. 3 представлены зависимости средней энергии от расстояния «вдоль» зерна для различных состояний расчетной области. Таким образом, показано, что граница зерен в рамках предложенной модели представляет переходную область, имеющую толщину 2–4 межатомных расстояний, что удовлетворяет известным экспериментальным данным [7].

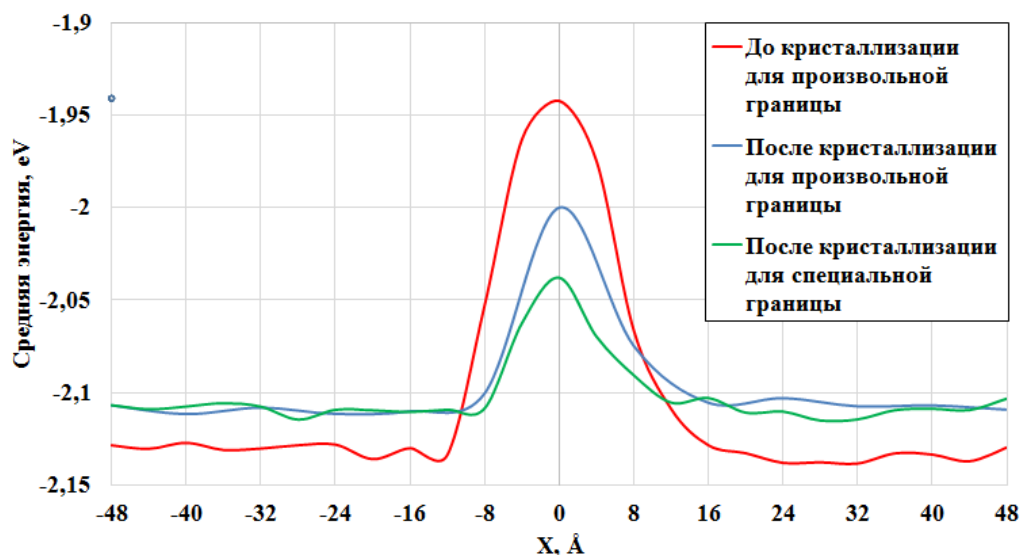


Рис.3 Зависимость средней энергии (на 1 атом) от координаты «вдоль зерна»

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-1298.2017.1.

Литература

1. Tang M., Carter W.C., Cannon R.M. Grain Boundary Transitions in Binary Alloys // Physical Review Letters. – 2006. – Vol. 97, Is. 7. – 075502.
2. Кривцов А.М., Кривцова Н.В. Метод частиц и его использование в механике деформируемого твердого тела // Дальневосточный математический журнал. — 2002. — Т. 3, № 2. — С. 254-276.
3. Daw M.S., Baskes M.I. Embedded-atom method: Derivation and application to impurities, surfaces, and other defects in metals // Physical Review B. — 1984. — Vol. 29, Is. 12. — Pp. 6443-6453.
4. Войтишек А.В. Основы метода Монте-Карло: учебное пособие. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2010. – 108 с.
5. Kelchner C.L., Plimpton S.J., Hamilton J.C. Dislocation nucleation and defect structure during surface indentation // Physical Review B. – 1998. – Vol. 58, Is. 17. – Pp. 11058-11088
6. Tsuzuki H., Branicio P., Rino J.P. Structural characterization of deformed crystals by analysis of common atomic neighborhood // Computer Physics Communications. – 2007. – Vol. 177, Is. 5 – Pp. 518 – 523.
7. Гусев А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства. – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – 198 с.

РАСЧЕТ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ЦИРКОНИИ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Гордеев И.С.

МФТИ,

ОИВТ РАН

E-mail: gordeevilu@gmail.com

Работа посвящена сопоставлению различных методов изучения границ переходов между различными фазами в цирконии.

Работа посвящена изучению границ переходов между различными фазами в цирконии. Исследованы границы перехода между ГПУ- и ОЦК- фазами, а так же ОЦК- фазой и расплавом. Расчеты проводились на основании двух различных межатомных потенциалов ЕАМ [1] и ADP [2]. Для проверки достоверности полученных результатов, точки переходов определялись различными методами, такими как однофазное моделирование с различными скоростями нагрева и охлаждения, двухфазное моделирование и расчет термодинамических параметров через фононные спектры. Метод однофазного моделирование с различными скоростями нагрева и охлаждения заключается в получении набора температур потери стабильности определенной фазы при различных скоростях, и последующей аппроксимации этих данных. Для метода двухфазного моделирования в расчетной ячейке создается две фазы, и далее по движению границы раздела фаз делается вывод о стабильности той или иной фазы. Расчет термодинамических параметров через фононные спектры основан на получении автокорреляционной функции для однофазных систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и расчета на основании этих данных фононных спектров, что позволяет вычислить свободную энергию.

Сопоставление результатов показывает, что расчет последним методом дает завышенные температуры переходов, что объясняется ангармонизмом циркония.

Литература

1. M.I. Mendeleev, G.J. Ackland, "Development of an interatomic potential for the simulation of phase transformations in zirconium," Phil. Mag. Lett., 87, 349-359 (2007)
2. D. E.Smirnova, S. V. Starikov (2017), "An interatomic potential for simulation of Zr-Nb system, Computational Materials Science," 129, 259-272

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ

Грачёва Н. А.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Майер А. Е.
ЧелГУ, Физический факультет, Кафедра теоретической физики
E-mail: nagra45da@gmail.com

Для оценки механических свойств конструкционных материалов используют различные схемы нагружения. Особый интерес представляют высокоскоростные деформации, которые могут привести к разрушению инженерных сооружений, рассчитанных только на статические нагрузки. Математические модели поведения материала позволяют описать динамику деформируемого тела. В качестве эмпирической модели, описывающей высокоскоростную деформацию металлов, была выбрана модель Зерилли-Армстронга [1].

В данной работе моделировалось распространение ударной волны в металле. Моделирование основано на численном решении уравнений механики сплошной среды в лагранжевых переменных [2]. Предполагалось, что при пластическом течении напряжения остаются на пределе упругости, что соответствует идеально пластической среде [3]. При описании результатов анализировалось изменение параметров, характеризующих состояние системы, для различных вариаций начальных условий. На следующем этапе работы считалось, что при пластическом течении напряжение непостоянно. Для перерасчета напряжения была использована модель Зерилли-Армстронга, основанная на положениях теории дислокаций. Подбор материальных констант, входящих в уравнение для металлов с ГЦК решеткой, программировался на основе испытательных данных, проводимых в широком диапазоне деформаций, скоростей деформаций и температур [4]. Модель учитывает размер зерна, термическое размягчение, деформационное упрочнение и скоростное деформационное упрочнение. С учетом вышесказанного моделировалось распространение ударной волны в металле. Проведен анализ полученных данных.

Программирование проводилось в интегрированной среде разработки Qt Creator. Код программы был написан на языке программирования C++.

Литература

1. Frank J. Zerilli and Ronald W. Armstrong, J. Appl. Phys. 61, 1816 (1987)
2. Яловец А.П. Расчет течений среды при воздействии интенсивных потоков заряженных частиц // ПМТФ, 1997, т. 38, № 1, 151-166
3. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике / Под ред. Б. Олдера, С. Фернбаха, М. Ротенберга. М.: Мир, 1967.
4. J.D.Seidt, A.Gilat, IJSS. 50(10), 2013, p. 1781-1790

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ ТИПА «РЫБИЙ ГЛАЗ»

Гулин В. В., Ефремов В. А.

Научный руководитель – к.т.н. Никитин А. Д.

МАИ, Институт №11, Кафедра физики конструкционных материалов

E-mail: kornet104@gmail.com

Непрерывное совершенствование двигателей различного назначения (авиационные, скоростные поезда, автомобили и т.д.) приводит к необходимости учета новых режимов нагружения, связанных с высокочастотными нагрузками малой амплитуды. Данный режим широко известен в литературе под названием сверхмногоцикловая усталость (СВМУ). Особенностью данного режима нагружения является возможность разрушения материала под действием напряжений существенно ниже классического предела усталости. При этом количество циклов нагружения до разрушения варьируется от 10^8 в 8 степени до 10^{10} в 10 степени, что на порядки больше баз испытаний для определения усталостных характеристик материала. В СВМУ режиме нагружения зарождение усталостной трещины происходит из-под поверхности образца или изделия, что принципиально отличает этот режим от известных областей малоциклового (МЦУ) и многоциклового усталости (МНЦУ).

Зарождение усталостной трещины в СВМУ, как правило, связано с внутренним дефектом материала (включения, поры, литейные дефекты и т.д.). Оценка длительности стадий зарождения и роста трещины в этом случае показывает доминирующую роль процесса зарождения (до 99 % от общей долговечности N_f). Таким образом, на рост усталостной трещины приходится порядка 1 % от N_f что позволяет определить проблему СВМУ, как проблему зарождения усталостных трещин.

Характерная поверхность излома при подповерхностном зарождении носит название «рыбий глаз» и имеет последовательность ярко выраженных областей: (1) дефект микроструктуры; (2) мелкозернистую область; (3) область с малой шероховатостью; (4) область с большой шероховатостью; (5) зона долома. Описание эволюции роста трещины в пределах каждой из зон является большой научной задачей.

В настоящей работе предлагается энергетическая модель эволюции усталостной трещины типа «рыбий глаз» в пределах области (2). На более поздних стадиях подповерхностная трещина может быть эффективно описана в рамках классической теории разрушения. При описании эволюции трещины в мелкозернистой зоне предлагается выделить два этапа: (а) формирования дефектной структуры в виде тонкого слоя сферических частиц; (б) образование свободной поверхности по наиболее поврежденным поверхностям дефектной структуры. Каждый из процессов определен своей энергоемкостью, а доля подводимой энергии является функцией количества циклов. Результаты оценки становления дефектной структуры сравниваются с результатами усталостных испытаний в области СВМУ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ БИКРИСТАЛЛА ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Давлятшин Р.П.

Научный руководитель – доцент, к.ф.-м.н. Волегов П.С.

ПНИПУ

E-mail: romadavly@gmail.com

В рамках работы построена математическая модель деформирования бикристалла меди на атомарном уровне с целью изучения эволюции дислокационной структуры кристаллитов и структуры границ зерен в процессе деформирования. Для этого применен метод молекулярной динамики (МД) и межатомный потенциал, основанный на методе погруженного атома (ЕАМ). Анализ атомарной структуры производился с помощью алгоритма определения дислокаций (DXA) и параметра центральной симметрии (CSP).

Введение. Получение материалов с заранее известными физико-механическими характеристиками позволяет создавать конструкции и изделия с улучшенными свойствами, которые находят применение во многих отраслях промышленности. В свою очередь, характеристики металлов и сплавов напрямую зависят от плотности и взаимного расположения различного рода дефектов: дислокаций, дефектов упаковки, межфазных границ, границ зерен, микроповреждений и т.д. [1]. Однако, большинство существующих на сегодняшний день моделей материалов не учитывают взаимодействие дефектов кристаллической решетки, или учитывают их опосредованно. Таким образом, актуальным является исследование особенностей взаимодействия микро- и мезодефектов, а также изучение их эволюции в процессе деформирования.

Методы. Целью работы является разработка, численная реализация и исследование математической модели, описывающей процесс деформирования бикристалла с учетом дефектной структуры кристаллитов с применением метода молекулярной динамики, изучение взаимодействия дислокаций и границы зерен, а также изучение эволюции дислокационной структуры и структуры самой межзеренной границы. Для моделирования используется метод молекулярной динамики, причем взаимодействие между частицами задается с помощью потенциала погруженного атома (ЕАМ) [2]. Полная энергия системы в таком случае представляется в виде:

$$E_{tot} = \frac{1}{2} \sum_{i,j (j \neq i)} \Phi_{s_i s_j}(r_{ij}) + \sum_i F_{s_i}(\rho_i), \quad (2)$$

где первое слагаемое – это сумма всех парных взаимодействий между атомами, $\Phi_{s_i s_j}(r_{ij})$ – функция парного взаимодействия между атомами i (химического элемента S_i) и j (химического элемента S_j), расположенным на расстоянии r_{ij} . Функция F_{s_i} – так называемая «энергия погружения» атома i , зависит от плотности электронов ρ_i в данной точке, созданной соседними атомами. Применение ЕАМ-потенциала в работе обосновано тем, что в потенциалах такого типа учитывается взаимодействие атомов с электронными облаками и электронным газом, что является важным при моделировании структуры металлов и их сплавов. В качестве моделируемого материала была выбрана технически чистая медь [3].

Модель и результаты. Изучение процесса взаимодействия межзеренной границы и дислокационной структуры проходило в два этапа. На первом этапе был сгенерирован бикристалл с устойчивой межзеренной границей [4] и углом разориентировки между кристаллитами 60 градусов. Далее в структуру кристаллической решетки были внесены дислокации; для этого в плоскости наиплотнейшей упаковки были удалены атомы, принадлежащие этой плоскости и содержащиеся в окружности некоторого радиуса, причем получающиеся «полости» были равномерно распределены внутри каждого кристаллита, после чего система была отрелаксированна при постоянной температуре.

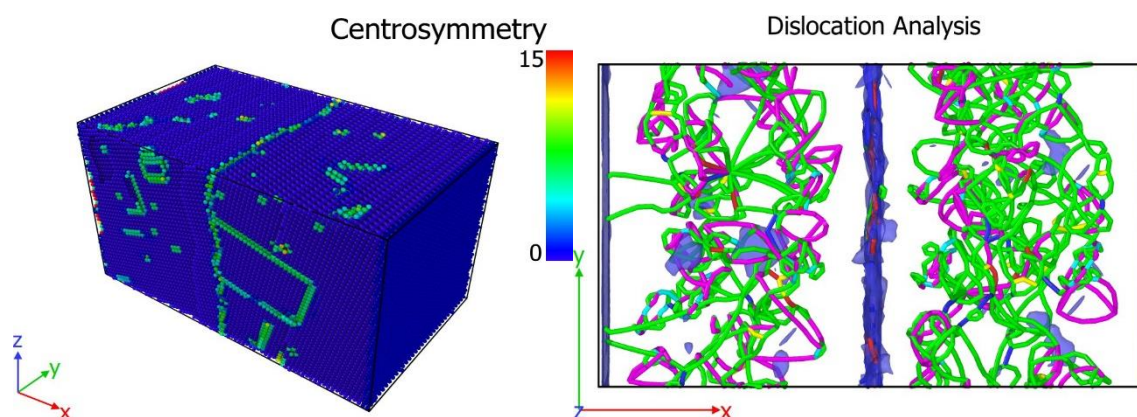


Рис. 1. Визуализация расчетной области до деформирования с углом разориентировки кристаллических решеток 60 градусов: с выделенными дефектными структурами (слева) и дислокационными линиями (справа)

На втором этапе проведено моделирование процесса деформации простого сдвига бикристалла с шагом интегрирования 1 фс. Для этого в системе выделялись две «жесткие» области, расположенные по краям моделируемой области. Одна из этих областей была зафиксирована, а атомам, принадлежащим второй области, сообщена некоторая постоянная скорость. Чтобы добиться скорости деформации, соответствующей квазистатическому деформированию, через каждые 1000 шагов интегрирования проводилась минимизация энергии системы методом имитации отжига. Процесс заканчивался при достижении накопленной деформации в 4%.

Анализ эволюции дислокационной и межзеренной структуры произведен с использованием алгоритма определения дислокаций (*dislocation extraction algorithm, DXA*) [5], а также параметра центральной симметрии (*central symmetry parameter, CSP*) [6]. Таким образом, в ходе исследования имитированы взаимодействия дислокаций и межзеренной границы, в том числе получены зависимости параметров, описывающих внутреннюю структуру бикристалла, от плотности дислокаций.

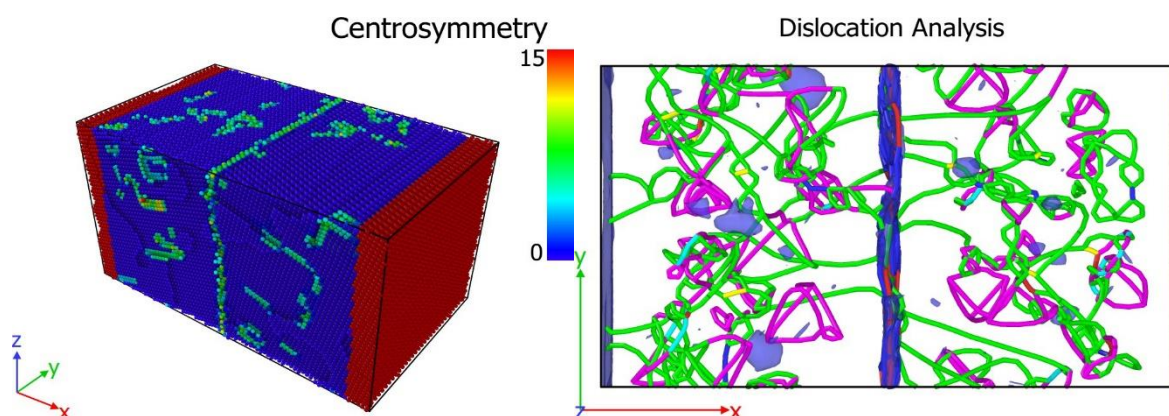


Рис. 2. Визуализация расчетной области после процесса деформирования с углом разориентировки кристаллических решеток 60 градусов: с выделенными дефектными структурами (слева) и дислокациями (справа)

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-1298.2017.1.

Литература

1. Орлов А.Н., Перевезенцев В.Н., Рыбин В.В. Границы зерен в металлах/под ред. Бернштейна М.Л., Новикова И.И. – Москва: Металлургия, 1980. – 153 с.

2. Daw M. S., Baskes M. I. Embedded-atom method: Derivation and application to impurities, surfaces, and other defects in metals // *Physical Review B*. – 1984. – Vol. 29, No. 12. – pp. 6443-6453.
3. Mishin Y., Mehl M.J., Papaconstantopoulos D.A., Voter A.F., Kress J.D. Structural stability and lattice defects in copper: Ab initio, tight-binding and embedded atom method calculations // *Physical Review B*. – 2001. – V. 63, No. 22. – 224106. doi: 10.1103/PhysRevB.63.224106
4. Volegov P.S., Gerasimov R.M. Modeling the formation of grain boundaries as a result of two-sided crystallization using molecular dynamics // *Key Engineering Materials*. – 2017. – V. 743. – pp. 181-186.
5. Stukowski A., Bulatov V. V., Arsenlis A. Automated identification and indexing of dislocations in crystal interfaces // *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* – 2012. – Vol. 20, No. 8. – 085007. DOI: 10.1088/0965-0393/20/8/085007
6. Cynthia L. Kelchner, S. J. Plimpton, J. C. Hamilton, Dislocation nucleation and defect structure during surface indentation // *Physical Review B*. – 1998. – Vol. 56, Is. 17. – pp. 11085 – 11088.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЯЗАННЫХ ТЕРМОУПРУГОДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Давыдов С.А., Земсков А.В., Федорова А.Д.

МАИ

E-mail: xenon_93@inbox.ru

Разработка технологий для получения новых материалов требует точных математических моделей. Примером может служить рассматриваемая одномерная нестационарная модель термоупругой диффузии для однородной многокомпонентной среды. В работе получены функции Грина, проведён анализ результатов и выполнен тестовый расчёт.

Введение. Создание новых материалов с исключительными свойствами и разработка технологий для их получения требуют не только передовой экспериментальной базы, но и точных математических моделей, описывающих сложные физические процессы. Одним из способов модификации и уточнения моделей современных и перспективных технологических процессов является учёт таких явлений как связанность различных взаимодействующих между собой полей. Примером такой связанности может являться модель термоупругой диффузии, в которой рассматривается взаимодействие механических, тепловых и диффузионных полей.

При моделировании высокоинтенсивных технологических процессов необходимо принять во внимание тот факт, что реализация большинства из них сопровождается значительными деформациями, мощными тепловыми потоками, высокими скоростями нагрева и переноса массы на поверхности материала. В таком случае возникает необходимость не только в учёте связанности, но и в рассмотрении конечных скоростей распространения тепла и вещества в исследуемой среде. Введение ненулевых времён релаксации и учёт связанности полей позволяет создать более точную и устойчивую математическую модель для описания такого рода технологических процессов как ионная имплантация, диффузионная пайка, термоводородная обработка, наращивание плёнок на различных подкладках и т.д. [1]

Постановка задачи. Рассматривается одномерная нестационарная задача термоупругой диффузии для однородной многокомпонентной среды с плоскими границами при учёте ненулевых времён релаксации [2, 3]. Физико-механические процессы, протекающие в условии поверхностных механических, тепловых и диффузионных воздействий, описываются с помощью локально-равновесной модели связанной термоупругой диффузии (штрих обозначает производную по безразмерной пространственной переменной x , а точки – производные по безразмерному времени τ), включающей

– уравнения движения упругой среды, теплопереноса и массопереноса:

$$\begin{aligned}\ddot{u} &= u'' - b_u \theta' - \sum_{q=1}^N \alpha_q \eta'_q, \\ \dot{\theta} + \tau_T \ddot{\theta} &= k \theta'' - b_T (\dot{u}' + \tau_T \ddot{u}') - \sum_{q=1}^N \beta_q (\dot{\eta}_q + \tau_T \ddot{\eta}_q), \\ \dot{\eta}_q + \tau_{q\eta} \ddot{\eta}_q &= D_q \eta''_q - \Lambda_q u''' - M_q \theta'' \quad (q = \overline{1, N}),\end{aligned}\tag{1}$$

– граничные условия (в случае слоя):

$$\begin{aligned}u|_{x=0} &= f_{11}(\tau), \quad \theta'|_{x=0} = f_{21}(\tau), \quad (\Lambda_q u'' + M_q \theta' - D_q \eta'_q)|_{x=0} = f_{31}(\tau), \\ u|_{x=1} &= f_{12}(\tau), \quad \theta'|_{x=1} = f_{22}(\tau), \quad (\Lambda_q u'' + M_q \theta' - D_q \eta'_q)|_{x=1} = f_{32}(\tau);\end{aligned}\tag{2}$$

– начальные условия:

$$u|_{\tau=0} = \dot{u}|_{\tau=0} = \theta|_{\tau=0} = \eta_q|_{\tau=0} = 0;\tag{3}$$

В задаче для полупространства условие на поверхности $x=1$ заменяется условием ограниченности искомых величин в рассматриваемой области [4].

В (1) – (3) используются следующие безразмерные величины (при одинаковом начертании размерные величины обозначены звёздочкой):

$$\begin{aligned}
x &= \frac{x_1}{L}, \quad u = \frac{u_1}{L}, \quad \tau = \frac{Ct}{L}, \quad C^2 = \frac{C_{1111}}{\rho}, \quad \alpha_q = \frac{\alpha_{11}^{(q)}}{C_{1111}}, \quad D_q = \frac{D_{11}^{(q)}}{CL}, \quad b_u = \frac{b_{11}T_0}{C_{1111}}, \\
\tau_T &= \frac{Ct_T}{L}, \quad \tau_{\eta q} = \frac{Ct_{\eta}^{(q)}}{L}, \quad \theta = \frac{T-T_0}{T_0}, \quad \Lambda_q = \frac{m^{(q)}n_0^{(q)}D_{11}^{(q)}\alpha_{11}^{(q)}}{\rho RT_0 CL}, \quad b_T = \frac{b_{11}}{\rho C_0}, \\
M_q &= \frac{n_0^{(q)}D_{11}^{(q)}\ln(n_0^{(q)}\gamma^{(q)})}{CL}, \quad \kappa = \frac{\kappa_{11}}{\rho C_0 LC}, \quad \beta_q = \frac{n_0^{(q)}R\ln(n_0^{(q)}\gamma^{(q)})}{m^{(q)}C_0}, \\
f_{1k}(\tau) &= \frac{f_{1k}^*(t)}{L}, \quad f_{2k}(\tau) = \frac{Lf_{2k}^*(t)}{T_0}, \quad f_{q+2,k}(\tau) = \frac{f_{q+2,k}^*(t)}{n_0^{(q)}C} \quad (k=1,2),
\end{aligned}$$

где t – время; x_1 – декартова координата; u_1 – компонента вектора перемещений; L – характерный размер среды (в случае слоя – его толщина); q – номер компоненты вещества в составе N -компонентной среды; $\eta^{(q)} = n^{(q)} - n_0^{(q)}$ – приращение концентрации; $n_0^{(q)}$ и $n^{(q)}$ – начальная и актуальная концентрации; t_T – время тепловой релаксации; $t_{\eta}^{(q)}$ – время диффузионной релаксации; C_{1111} – упругая постоянная; ρ – плотность; b_{11} – температурная постоянная, характеризующая тепловые деформации; $\alpha_{11}^{(q)}$ – коэффициенты, характеризующие объёмное изменение среды за счёт диффузии; $D_{11}^{(q)}$ – коэффициент самодиффузии; $m^{(q)}$ – молярная масса; R – универсальная газовая постоянная; T и T_0 – актуальная и начальная температуры; κ_{11} – коэффициент теплопроводности; $\gamma^{(q)}$ – коэффициент активации; C_0 – удельная теплоёмкость при постоянных концентрации и деформации, $f_{lk}^*(t)$ – поверхностные возмущения ($l = \overline{1, N+2}$).

Решение задачи ищется в интегральной форме, которая представляет собой свёртку по времени функций Грина с правыми частями граничных условий. Для нахождения функций Грина используются преобразование Лапласа по времени и, в случае слоя, разложение искомых функций в тригонометрические ряды Фурье по координате. Для полупространства разложение в ряды Фурье заменяется синус- и косинус-преобразованием. В результате преобразований трансформанты искомых функций выражаются как рациональные дроби относительно параметра преобразования Лапласа, а их оригиналы находятся с помощью известных теорем и таблиц операционного исчисления. Обращение синус- и косинус-преобразований предполагается производить численно. Проведён анализ полученных функций Грина с учётом выделенных в них особенностей. Выполнен тестовый расчёт.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 17-08-00663 А).

Литература

1. Ахметова Е.Р., Давыдов С.А., Земсков А.В. Применение линейной нестационарной модели механоидиффузии в расчёте технологических процессов на примере ионной имплантации // Тезисы докладов V международного научного семинара «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы». – М.: 2016, С. 25-27.
2. Князева А. Г. Введение в термодинамику необратимых процессов. Лекции о моделях. – Томск: Изд-во «Иван Федоров», 2014. – 172 с.
3. Давыдов С. А., Земсков А. В., Тарлаковский Д. В. Поверхностные функции Грина в нестационарных задачах термомеханоидиффузии // Проблемы прочности и пластичности. – 2017. – Т.79, №1. – С. 38-47.
4. Davydov S.A., Zemskov A.V., Tarlakovskii D.V. An Elastic Half-Space under the Action of One-Dimensional Time-Dependent Diffusion Perturbations // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2015. – Vol. 36, No. 4. – P. 503-509.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УЧАСТКОВ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА С НЕПРОЕКТНЫМИ НАГРУЗКАМИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА ДАННЫХ ВНУТРИТРУБНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Демин А.И.¹, Лисовенко Д.С.²

¹ ООО «НИИ Транснефть»,

² ИПМех РАН

E-mail: deminaliv@gmail.com

Описана проблематика оценки технического состояния магистральных трубопроводов при эксплуатации. Приведены результаты анализа аварий на магистральных трубопроводах с выводом о необходимости своевременного определения участков с непроектными нагрузками. Описаны современные методы внутритрубной диагностики магистральных трубопроводов. Предложен алгоритм определения участков магистрального трубопровода с изменением радиуса изгиба с использованием доступных данных внутритрубной диагностики.

Одной из важнейших задач в нефтегазовой отрасли является обеспечение высокой надежности и безопасности при эксплуатации трубопроводных систем. При проектировании магистральных трубопроводов используется прямой метод решения задач прочности, при котором по заданным граничным условиям и проектным нагрузкам вычисляются действующие напряжения в стенке трубопровода, после чего подбирается конфигурация и толщина стенки для соответствия требованиям нормативной документации [1]. Для учета в расчетах возможных отклонений значений нагрузок, механических свойств и условий производства труб вводятся соответствующие коэффициенты запаса.

Основные нагрузки на магистральные трубопроводы обусловлены взаимодействием с грунтом либо самого трубопровода (для подземных и наземных трубопроводов) либо фундаментов опор (для надземных трубопроводов). При проектировании принимается допущение о равномерности и неизменности во времени свойств грунта на участке проектирования. В случае возможных изменений, которые могут повлиять на безопасность эксплуатации, принимается решение об изменении трассы трубопровода либо о применении дополнительных технических решений, направленных на обеспечение принятых в проекте свойств грунтов (например, установка термостабилизаторов для обеспечения требуемой несущей способности грунта в области распространения многолетнемерзлых грунтов).

Анализ аварий на магистральных трубопроводах [2, 3, 4] показывает, что причины аварий можно разделить на 2 основные группы:

- развитие дефектов в стенке трубопровода или сварных швах (образовавшихся при производстве, строительстве или эксплуатации);
- действие непроектных нагрузок (вследствие несоблюдения требований проектной документации при строительстве либо неучтенных в проекте воздействий).

При этом на стадиях производства и строительства проводится многоуровневый контроль с применением методов неразрушающего контроля с целью выявления дефектов, а также в проектных расчетах применяется коэффициент запаса, учитывающий возможность наличия в материале и сварных швах дефектов, которые могут быть не выявлены при контроле. Рост таких дефектов в условиях проектных нагрузок практически невозможен. Таким образом, можно предположить, что аварии из первой подгруппы были вызваны ростом дефектов в условиях действия непроектных нагрузок.

Учитывая вышеизложенное можно сделать вывод, что основной задачей для обеспечения высокой надежности и безопасности при эксплуатации трубопроводных систем является своевременное определение участков с непроектными нагрузками в рамках работ по мониторингу и диагностике при эксплуатации.

В настоящее время основным методом диагностики линейной части магистральных трубопроводов является внутритрубная диагностика. Внутритрубные инспекционные приборы (далее ВИП) подразделяются по решаемым задачам на 2 типа: предназначенные для обнаружения дефектов и определения их параметров (ВИП, основанные на методах ультразвуковой и магнитной диагностики) и для определения геометрических параметров трубопровода (профилемеры и ВИП определения положения трубопровода (далее ВИП

ОПТ)).

В настоящее время в состав ВИП ОПТ стали входить инерциальные навигационные системы. С их помощью решается следующий комплекс задач [5, 6]:

- определение координат трубопровода;
- измерение радиусов поворота отводов;
- измерение радиусов изгиба прямолинейной части трубопровода;
- измерение углов поворота отводов, углов излома косых стыков;
- измерение величины и направления перемещения участков трубопровода в процессе эксплуатации по результатам сравнения двух пропусков.

В рамках выполненной работы разработан алгоритм определения участков магистрального трубопровода с изменением радиуса изгиба, что может являться следствием воздействия непроектных нагрузок.

При комплексном анализе данных ВИП ОПТ, проектной и исполнительной документации и данных мониторинга проводится классификация выявленных участков по причинам изменения радиуса изгиба трубопровода, определяются участки с предполагаемыми непроектными нагрузками и причины их возникновения.

Полученные участки ранжируются по степени опасности с учетом предполагаемых непроектных нагрузок, после чего назначаются дополнительные обследования для подтверждения результатов анализа данных. По результатам дополнительных обследований назначаются компенсирующие мероприятия и производится обновление данных в методике по определению причин возникновения радиуса изгиба трубопровода.

Результаты анализа данных ВИП ОПТ позволяют подтвердить результаты расчетов прогнозного планово-высотного положения на участках с ММГ и опасными геологическими процессами, либо определить участки для проведения дополнительных обследований с целью уточнения исходных данных, применяемых в расчетах.

Описанная методика позволяет выявлять участки с непроектными нагрузками на всем протяжении диагностируемого трубопровода, а не только на участках с выявленными на стадии проектирования многолетнемерзлыми грунтами и опасными геологическими процессами. При этом непрерывность измерения позволяет получить данные с частотой до 100 измерений на метр, что исключает возможность пропустить участок с критическими для безопасной эксплуатации трубопровода нагрузками.

Для увеличения точности определения участков с непроектными нагрузками, а также для прогнозирования появления таких участков необходимо проведение исследований в области анализа данных внутритрубной диагностики с применением методов машинного обучения.

Литература

1. СНиП 2.05.06-85*. Магистральные трубопроводы. М : ФГУП ЦПП, 2005. 60 с.
2. Дубинский В.И., Егоров И.Ф, Лопатин А.С. Теория и практика испытаний на прочность и ввода в действие газопроводов. М.: ООО «МАКС Пресс», 2015. 576 с.
3. Гостинин И.А., Вирясов А.Н., Семенова М.А. Анализ аварийных ситуаций на линейной части магистральных газопроводов // Инженерный вестник Дона. 2013. №2 (25). С.24.
4. Поникаров С.И., Алексеев В.А., Вилохина П.В., Маннанова А.Ф. Анализ причин возникновения аварий на магистральных нефтепроводах // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. №23. С.365-368.
5. Кирьянов М.Ю., Орлов В.В. Применение инерциальных навигационных систем во внутритрубной диагностике // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. Т.7. №3. С. 84-95.
6. Ишлинский А.Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. М.: Наука, 1976. 672 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

Добрянский В. Н.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Соляев Ю. О.

МАИ, Факультет №9, Кафедра 902

E-mail: aprilvasya@gmail.com

Исследуется композиционный материал на основе модифицированной эпоксидной матрицы с повышенными деформационными характеристиками, армированной углеродными волокнами. Представлены результаты статических испытаний на растяжение и сжатие образцов с различной схемой армирования. По результатам испытаний идентифицированы механические свойства однонаправленных слоев (монослоев) с использованием классической модели слоистых композитов. Полученные данные сопоставлены с результатами расчетов в рамках микромеханического подхода, реализованного с использованием модели цилиндрического включения, метода Мори-Танака и различных критериев прочности. Продемонстрировано отличие прогнозов, получаемых в рамках микро- и макромеханического подходов для эффективных свойств монослоя.

Также представлены результаты высокоскоростных испытаний исследуемых композитов на сжатие. Установлено значительное снижение прочностных свойств композиционного материала при повышенных скоростях деформаций. При этом по результатам испытаний установлено, что свойства материала матрицы незначительно изменяются при действии высокоскоростного нагружения. Установлено изменение характера разрушения образцов. При высокоскоростных испытаниях в образце появлялись трещины, расположенные параллельно действующей нагрузке. В статических же испытаниях образец разрушался полностью.

Представлены результаты томографических исследований микроструктуры композитов, проведенных до и после проведения испытаний. Показана возможность возникновения внутренних дефектов в виде расслоений в образцах, выдержавших высокоскоростные испытания без разрушения.

МАТЕМАТИКА АРХИТЕКТУРЫ ОДНОПОЛОСТНОГО ГИПЕРБОЛОИДА В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Жигалова А.И.
МГТУ им. Н.Э.Баумана
E-mail: aelita99@list.ru

С помощью аддитивных технологий создана модель высотной башни, прототипом для которой стала стержневая конструкция В.Г.Шухова. Однако новая модель изготовлена в виде оболочки. При математических расчётах максимально соблюдалось архитектурное правило золотого сечения.

Введение. Цель работы заключается:

- 1) в математическом предложении технического и архитектурного решения высотного сооружения как продолжения развития математических идей В.Г.Шухова;
- 2) в снятии ряда технологических ограничений для перспективных конструкций;
- 3) в сочетании математических принципов с гармонической архитектурой.

Классическим примером технической реализации однополостного гиперboloида «старыми» технологиями служит Шаболовская телебашня конструкции В.Г.Шухова [1,2]. Форма башни выбрана конструктором по нескольким причинам.

1. Однополостный гиперboloид имеет прямолинейные образующие [3].
2. Верхняя часть каждой секции – это «горлышко» однополостного гиперboloида.
3. Высоты первых секций приблизительно одинаковые.
4. Стержни нагружены почти одинаково в каждой точке, получилась почти равнопрочная более лёгкая конструкция.
5. Масса конструкции уменьшилась в 4 раза по сравнению с Эйфелевой башней.

Методы. Конструкции В.Г.Шухова были созданы сто лет назад, когда не было возможности реализовать более рациональные технические решения. Например, в то время железобетон только начинал осваиваться. Останкинская башня создавалась позднее на основе железобетона и стальных натянутых тросовых стяжек. Сейчас очень быстро развиваются аддитивные 3D-технологии. Появляется возможность изготовить конструкции в виде сложных оболочек, о которых В.Г.Шухов не мог даже мечтать с технологической точки зрения [4,5,6,7]. На основе современных аддитивных технологий можно снять первое ограничение – изготовить не круговой, а эллиптический однополостный гиперboloид. Ориентация большой оси эллипса по розе ветров позволит снизить ветровые нагрузки и облегчить конструкцию. Второе ограничение, которое предлагается снять с перспективных проектов математически, – это отказ от «горлышка» однополостного гиперboloида в верхних основаниях секций. В.Г.Шухов не мог расширить конструкцию секций в верхней части, потому что через «горлышко» проходил подъём вышележащих секций, они просто не прошли бы внизу в самом узком месте. Вертолётов и высотных кранов в то время не было. Главное направление работы заключается в переходе от конечного числа прямолинейных образующих в сооружениях В.Г.Шухова к несчётному множеству образующих, то есть к оболочкам. Такой переход стал возможен в настоящее время благодаря развитию аддитивных технологий и возможностью реализации с их помощью сложных математических объектов.

Однополостный гиперboloид был изучен на предмет возможности соблюдения правил «золотого» сечения при архитектурном проектировании. На защиту выносятся три положения. Во-первых, математическое доказательство возможности соблюдения четырёх независимых соотношений «золотого» сечения гиперболических секций высотной конструкции. Во-вторых, следствие пятого «золотого» соотношения из сформулированных четырёх принципов. В-третьих, невозможность соблюсти шестое «золотое» сечение по «горлышку» гиперboloида, но возможность выполнить его приближённо с относительной ошибкой не более 13%. Для доказательства правильности математических расчётов было сформулировано Техническое задание и был выдан заказ на изготовление аддитивными технологиями двух комплектов макетов перспективной высотной башни. Техническое задание иллюстрировано программными средствами MathCAD-14. Заказ был принят

специализированной фирмой для изготовления с доработкой Технического задания по необходимому для 3D-принтера программному обеспечению. Сертификаты получены. Архитектурные правила основаны на частом применении «золотого» сечения $\mu \approx 1,618$. Появилась первая математическая задача о соотношении размеров. Получается гармоническая убывающая геометрическая прогрессия высот секций, сходящаяся к предельной возможной высоте башни. Для доказательства правильности математических расчётов сформулировано техническое задание и выдан заказ на изготовление аддитивными технологиями двух комплектов макетов перспективной высотной башни. Размеры указаны в миллиметрах.

Техническое задание для 3D-моделирования

Нулевая секция: $\frac{x^2}{70,7^2} + \frac{y^2}{43,7^2} - \frac{z^2}{200,0^2} = 1$, где $z \in [-323,6 ; 200,0]$.

Первая секция: $\frac{x^2}{43,7^2} + \frac{y^2}{27,0^2} - \frac{z^2}{123,6^2} = 1$, где $z \in [-200,0 ; 123,6]$.

Вторая секция: $\frac{x^2}{27,0^2} + \frac{y^2}{16,7^2} - \frac{z^2}{76,4^2} = 1$, где $z \in [-123,6 ; 76,4]$.

Третья секция: $\frac{x^2}{16,7^2} + \frac{y^2}{10,3^2} - \frac{z^2}{47,2^2} = 1$, где $z \in [-76,4 ; 47,2]$.

Четвёртая секция: $\frac{x^2}{10,3^2} + \frac{y^2}{6,4^2} - \frac{z^2}{29,2^2} = 1$, где $z \in [-47,2 ; 29,2]$.

Пятая секция: $\frac{x^2}{6,4^2} + \frac{y^2}{4,0^2} - \frac{z^2}{18,0^2} = 1$, где $z \in [-29,2 ; 18,0]$.

Математические расчёты и аддитивная технология была применена для создания макета высотной башни на основе шести секций в виде однополостных гиперboloидов. Для доказательства правильности математических расчётов сформулировано Техническое задание и выдан заказ на изготовление аддитивными технологиями двух комплектов макетов перспективной высотной башни. Техническое задание иллюстрировано программными средствами MathCAD-13. Заказ был принят специализированной фирмой для изготовления с доработкой Технического задания по необходимому для 3D-принтера программному обеспечению. Сертификаты получены. Один комплект макета башни предназначен для испытаний под нагрузкой до разрушения на измерительном прессе. Второй комплект макета башни является демонстрационным. Реализация гармонического «золотого» сечения приводит к убыванию размеров секций по геометрической прогрессии. Это определяет предельную высоту башни.

Продолжение работы планируется в области создания новых материалов, в том числе композиционных, на основе хорошей несущей способности и прочностных характеристик однополостного гиперboloида.

Литература

1. Андреев Н.Н. и др. Ажурная башня / Математические этюды. – Электронный ресурс: <http://www.etudes.ru/ru/etudes/shukhov/>
2. Шуховские башни // Математическая составляющая / Ред.-сост. Н.Н.Андреев, С.П.Коновалов, Н.М.Панюнин. – М.: Математические этюды, 2015. – С.60-61. – Электронный ресурс: <http://book.etudes.ru/toc/shuhov/>
3. Привалов И.И. Аналитическая геометрия. Учебник для вузов. – Изд. Юрайт, 2016.
4. Жигалова А.И. Гармоническая математика однополостного гиперboloида. – Электронный ресурс (видеоролик 8 минут): <https://youtu.be/XD29txJO0gE>
5. Жигалова А.И. Математическая архитектура однополостного гиперboloида в аддитивных технологиях / Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2017. Школьные работы: М.: Моск. авиационный ин-т (национальный исследовательский университет), 2017. 226 с. – С.23-24. – Электронный ресурс: <https://mai.ru/science/gagarin/materialy-konferentsii/>
6. Жигалова А.И. 3D-моделирование в конкурсных проектных работах школьного кружка // Материалы XXVIII Международной конференции "Современные информационные технологии в образовании". Научно-методическое издание / Редакционная

- группа: Алексеев М.Ю. и др. - Троицк-Москва, 27 июня 2017 г. - ISBN 978-5-9907219-4-4 - Электронный ресурс: http://ito.bytic.ru/uploads/files/conf_2017.pdf - С.373-374.
7. Жигалова А.И. Математическая архитектура высотной башни на основе однополостного гиперboloида // Строительство — формирование среды жизнедеятельности [Электронный ресурс] : сборник трудов XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (26–28 апреля 2017 г., Москва) / М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. — Электрон. дан. и прогр. (73,7 Мб). — Москва : Изд-во Моск. гос. строит. унта, 2017. — ISBN 978-5-7264-1660-1 С.71-73. — Эл. Ресурс: <http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkrdostupa/>

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА С ПОМОЩЬЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛОГА ЭКВИВАЛЕНТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Загаровский А. А.

Научный руководитель – профессор, д.ф.-м.н. Беклемишев Н. Н.
МАИ, Институт №11, Кафедра физики конструкционных материалов
E-mail: zagarovskiy93@mail.ru

Развитие методов физической мезомеханики позволило предложить метод описания предельного состояния материала через универсальную характеристику – предельную плотность энергии деформации. Этот подход реализуется через введение эквивалентного напряжения [1], не зависящего от вида внешнего воздействия. Такой подход основан на современном понимании механизмов развития дефектной структуры как совокупности самоорганизованных и самосогласованных процессов, протекающих сразу на нескольких масштабных уровнях [2-4]. Современные исследования рассматривают возможность непосредственного перехода от напряжений к плотности энергии деформации, при этом напряжение всегда выступает как усредненная по некоторому объему величина. Фактически, этот подход расширяет возможности использования классического описания свойств материала. Это становится возможным благодаря физически обоснованному переходу между механикой сплошной среды и физикой кристаллической структуры.

В представленной работе рассматривается возможность применения энергетического эквивалента предельного напряжения в нормальных условиях опыта для различных видов внешнего воздействия. В частности, делается оценка размера зоны локальной деформации, наблюдаемой при сверхмногоцикловом нагружении сплава ВТЗ-1. Делается вывод об определяющем значении локализации напряжений при этом виде воздействия. Формулируется вид энергетического критерия разрушения, основанного на принципе накопления повреждений, применимого для макро- и мезомасштабного уровней описания.

Выдвигается гипотеза, что плотность энергии, соответствующая предельному напряжению, является предельной характеристикой для материала и в случае воздействия ионизирующего излучения. На основе этого предположения делается оценка радиуса деформированной области вокруг трека иона золота с энергией 1 ГэВ в сплаве ВТЗ-1.

Таким образом, устанавливается связь между силовыми и энергетическими характеристиками материала с учетом детального рассмотрения механизмов эволюции дефектной структуры при конкретном внешнем воздействии. Представлено единообразное описание самоорганизованного и самосогласованного развития дефектной структуры на различных масштабных уровнях и показано, что понятие эквивалентного напряжения может быть расширено на случаи разрушающего воздействия различной природы, например, ионизирующего излучения.

Литература

1. Шанявский А.А. Эквивалентное напряжение одноосного циклического растяжения как энергетическая характеристика усталости металла в условиях многопараметрического нагружения // Физ. мезомех. - 2017. - Т. 20. - № 4. - С. 33-42
2. Панин В.Е. Синергетические принципы физической мезомеханики. Физическая мезомеханика, Т. 3, № 6. 2000. С. 5-36.
3. Иванова В.С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов. Москва: Наука, 1992. 289 с.
4. Шанявский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации. Уфа: Монография. 2007. 495 с.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОДНОРОДНОЙ КОНСОЛЬНО-ЗАКРЕПЛЕННОЙ ПЛАСТИНЫ С ПЛОСКОЙ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ЗВУКОВОЙ ВОЛНОЙ

Иванов С. И.

Научный руководитель – доцент, к.т.н. Локтева Н. А.

МАИ, Факультет №9, Кафедра 902

E-mail: Stanis-ivanov@yandex.ru

В настоящее время человек обитает в достаточно агрессивной окружающей среде, где одним из вредных факторов, воздействующих на организм, является повышенный шумовой фон. Одной из актуальных задач с точки зрения практики является организация эффективной звукоизоляции. Наиболее широко в данной области используются пластины, выполненные из однородного материала, которые наиболее просты в изготовлении и экономически оправданны.

В данной работе исследуются взаимодействие плоской гармонической волны с консольно-закрепленной однородной пластиной, что является упрощенной моделью звукозащитных экранов, широко используемых для ограждения жилых массивов от шума магистралей. Результатом решения данной задачи, является возможность определить амплитуды давлений прошедшей и отраженной волны, а также параметр звукоизоляции преграды.

Основной целью является вычисление коэффициента звукопоглощения преграды как функции частоты и пространственных координат. Рассматривается плоская постановка задачи. Математическая модель включает в себя задание давления, уравнения движения для пластины и акустической среды, краевые условия для пластины, условия на бесконечности, а также условия контакта акустической среды с препятствием и неподвижной полуплоскостью.

В результате поставленная задача решается с помощью определения функций влияния для пластины и рассмотрения совместного решения уравнений колебаний пластины и акустической среды. Для чего было составлено уравнение движение пластины с учетом гармоничности всех входящих в нее функций, определены константы и функции влияния для нормальных перемещений [1].

Далее была рассмотрена граничащая с пластиной четверть плоскости, заполненная акустической жидкостью. Движение среды задавалось с помощью волнового уравнения Гельмгольца в потенциалах[2], что позволило установить взаимосвязь кинематических параметров пластины с амплитудой давления волны в среде с учетом конфигурации пространства. В результате совместного решения уравнения движения пластины и движения среды было получено интегро-дифференциальное уравнение, которое решалось методом последовательных приближений.

В результате полученных значений перемещений, после выполнения нескольких последовательных приближений, и на основании соотношений потенциала скорости, амплитуд давлений в прошедшей и отраженной волнах, можно определить коэффициент звукопоглощения и показатель звукоизоляции.

В данной работе приведен метод решения связанной задачи о взаимодействии плоской гармонической волны и консольно-закрепленной пластины. Полученные результаты зависят от материала, из которого выполнена пластина и ее геометрических параметров. Таким образом, становится возможным выбирать оптимальные параметры материала, из которого выполнена пластина, и ее геометрию, что представляет существенный практический интерес.

Литература

1. Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Волны в сплошных средах. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 472 с.
2. Полянин А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. — 576 с.

АНАЛИЗ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ В ВОЛНОВОМ ПОЛЕ КЛЕЙНА-ГОРДОНА

Игушева Л. А.

Научный руководитель – профессор, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Петров Ю. В.

СПбГУ, Математико-механический факультет, Кафедра теории упругости

E-mail: st040152@student.spbu.ru

В данной работе рассматривается модель взаимодействия элементов инженерных конструкций с упругой окружающей средой. А именно, рассмотрено распространение перемещений и напряжений, возникающих в стержне постоянного поперечного сечения, при динамической нагрузке. Со стороны среды на стержень действуют силы сопротивления прямо пропорциональные перемещению.

Такая модель может быть применима во многих областях. Например, в настоящее время является актуальным изучение нанокомпозитов с включениями в виде волокон. Благодаря связи между матрицей полимера и включениями, такие нанокомпозиты обладают удивительными механическими характеристиками, в частности высоким пределом прочности и большим значением модуля Юнга. Современные наноматериалы являются перспективными в авиастроении. Например, они обладают антистатическими свойствами и могут защищать самолет от ударов молний. В макром мире одним из примеров является установка свай в строительстве. При этом, очень важно знать какие напряжения и перемещения возникают в свае, так как это позволит рассчитать нагрузки, которые сможет выдержать конструкция.

В результате проделанной работы получено уравнение продольных колебаний стержня, взаимодействующего с упругой средой, которое оказывается известным уравнением Клейна-Гордона. Найдено решение этого уравнения, вычислены перемещения и напряжения, возникающие в стержне при динамическом нагружении. Затем рассмотрены распространение и отражение волны от свободной границы стержня конечной длины.

Рассмотрено несколько частных случаев, как распространяются волны в зависимости от нагружающей силы. Более того, найдена зависимость поведения стержня от частоты возмущающей нагрузки. При больших значениях частоты мы можем наблюдать колебания стержня, при маленьких – волны стремительно гаснут. Построены соответствующие графики напряжений и перемещений от координаты поперечного сечения.

В задаче отражения волны от свободного конца стержня показана возможность эффекта откольного разрушения. Обнаружено, что при небольших значениях коэффициента сопротивления среды и достаточно больших значениях частоты возмущающей силы напряжение в стержне может достигать больших значений по сравнению с исходной нагрузкой. Именно в этих условиях вероятность разрушения стержня в результате интерференции прямой и отраженной волн очень велика. Отмечены особенности, отличающие данный процесс от классического случая.

Для предсказания условий инициирования хрупкого разрушения стержня при отколе под действием приложенной динамической ударной нагрузки применен критерий инкубационного времени разрушения. В нескольких частных случаях найдены пороговые значения амплитуды возмущающей силы, при которых происходит разрушения стержня.

Литература

1. Petrov Y.V. Structural-temporal approach to modeling of fracture dynamics in brittle media// Rock Dynamics and Applications - State of the Art /Eds Jian Zhao, Jianchun Li/. 2013. CRC Press, Taylor & Francis Group, London, 101-110;
2. Сироткин О. С., Андрюнина М. А. Перспективы применения нанокомпозитов в авиации //Авиационная промышленность № 2 – 2013, с 53-55.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАДКИ ТРЕХСЛОЙНОЙ ЖЕСТКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПОЛОСЫ МЕЖДУ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПЛИТАМИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ТРЕНИЯ

Идрисов Д. М.^{1,2}

Научный руководитель – доцент, к.ф.-м.н. Лямина Е. А.¹

¹ ИПМех РАН

² МФТИ, ФАКИ, Кафедра Механика и процессы управления

E-mail: idrisov.dim@mail.ru

Приведены результаты численного моделирования процесса осадки трехслойной полосы между параллельными шероховатыми плитами при различных режимах трения, где внутренний слой полосы предполагается жесткопластическим упрочняющимся, а два внешних слоя предполагаются идеально жесткопластическими.

Интенсивная пластическая деформация, возникающая вблизи поверхностей трения из-за сингулярного поля скоростей, оказывает влияние на образование ультрамелкозернистых слоев вблизи этих поверхностей [1], такие материалы чрезвычайно перспективны для применения в качестве конструкционных материалов в области авиастроения, космической техники, судостроения и тд. Из анализа экспериментальных работ известно, что слои с измененной структурой возникают в различных процессах деформирования вблизи контакта материалов.

Задача о плоском течении жесткопластической полосы при сжатии между параллельными шероховатыми плитами является одной из классических задач теории пластичности (задача Прандтля о сжатии полосы). Решение для однородной идеально жесткопластической полосы представлено в [2], для идеально жесткопластической упрочняющейся полосы в [3,4] и для многослойной полосы в [5,6].

В работе [7] получено решение для процесса осадки полосы, состоящей из двух слоев идеально жесткопластического материала, примыкающих к плитам, и внутреннего жесткопластического упрочняющегося слоя. При этом принимается достаточно общий закон изотропного упрочнения.

В данной работе получены и проанализированы численные результаты, демонстрирующие поле напряжений и скоростей, а так же построен график накопленной деформации в зависимости от толщины внутреннего слоя, для процесса осадки трехслойной полосы между параллельными шероховатыми плитами при условии проскальзывания и прилипания на поверхности контакта слоев. Внутренний слой полосы предполагается жесткопластическим и упрочняющимся по закону Свифта, два внешних слоя предполагаются идеально жесткопластическими.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-08-01063.

Литература

1. Griffiths B.J. Mechanisms of white layer generation with reference to machining and deformation processes // Trans. AMSE J. Trib. 1987. V. 109. P. 525–530.
2. Хилл Р. Математическая теория пластичности. М.: Гостехиздат, 1956. 407 с.
3. Дудукаленко В.В., Ивлев Д.Д. О сжатии полосы из упрочняющегося пластического материала жесткими шероховатыми плитами // Докл. АН СССР. 1963. Т. 153. № 5. С. 1024–1026.
4. Быковцев Г.И. О сжатии анизотропно упрочняющегося пластического слоя шероховатыми плитами // Докл. АН СССР. 1964. Т. 157. № 1. С. 66–68.
5. Alexandrov S., Mishuris G., Miszuris W. An analysis of the plane-strain compression of a three layer strip // Arch. Appl. Mech. 2001. V. 71. № 8. P. 555–566.
6. Alexandrov S., Tzou G.&Y., Huang M.&N. Plane strain compression of rigid/perfectly plastic multi-layer strip between parallel platens // Acta Mech. 2006. V. 184. № 1–4. P. 103–120.
7. Александров С., Гольдштейн Р. Исследование процесса осадки трехслойной жесткопластической полосы между параллельными плитами // Механика твердого тела. 2014. № 6. С. 120-131.

ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ ЗАДАЧА О КОНТАКТЕ ЖЕСТКОГО ШТАМПА И ОСНОВАНИЯ С ПОКРЫТИЕМ С УЧЕТОМ СЛОЖНЫХ ФОРМ КОНТАКТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Казаков К.Е.
ИПМех РАН,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
E-mail: kazakov-ke@yandex.ru

Рассмотрена осесимметричная задача контакта основания с покрытием и кольцевого жесткого штампа. Предполагается, что форма тонкого верхнего слоя (покрытия) и форма основания штампа описываются различными быстро изменяющимися функциями. Получены основное интегральное уравнение задачи и дополнительное условие. Для построения решения применен проекционный метод А.В. Манжирова. Он позволяет получать решение уравнения с высокой точностью, в то время как этого невозможно достичь другими известными методами.

Постановка задачи. Предположим, что вязкоупругий слой произвольной толщины H с тонким покрытием толщины $h(r)$, сделанным из вязкоупругого материала с другими свойствами, лежит на жестком основании. Переменная толщина покрытия может быть обусловлена как особенностями изготовления основания, в том числе аддитивного, когда верхний поверхностный слой имеет отличные от основного слоя механические характеристики, так и обработкой поверхностных слоев уже готового основания. Переменную толщину покрытия можно использовать и с целью минимизации уровней действующих в основании технологических напряжений и формирования выгодных распределений контактных напряжений в зонах опирания конструкций, возводимых на основании. Моменты изготовления верхнего и нижнего слоев обозначим через τ_1 и τ_2 , соответственно. Рассматривается случай, когда жесткость покрытия не превышает жесткости нижнего слоя. Между слоями, а также между нижним слоем и подстилающим основанием осуществляется либо идеальный, либо гладкий контакт.

В некоторый момент времени τ_0 осевая сила $P(t)$ начинает вдавливать жесткий кольцевой штамп, внутренний радиус которого равен a , а внешний b , в описанное основание. При этом ось штампа совпадает с центром осевой симметрии основания. Функция $g(r)$, описывающая расстояние между контактными поверхностями в недеформированном состоянии, называется функцией зазора. Если функция $f(r)$ описывает форму основания штампа, то $g(r) = f(r) - h(r) + h_0$, где $h_0 = -\min_{r \in [a,b]} [f(r) - h(r)]$. В случае, если контакт согласованный, $g(r) \equiv 0$. Область контакта постоянна и совпадает с кольцом шириной $(b - a)$. Толщина покрытия должна быть мала по сравнению с шириной кольца, то есть $h(r) \ll b - a$.

Интегральное уравнение поставленной задачи имеет вид

$$(\mathbf{I} - \mathbf{V}_1) \frac{\partial q(r, t) h(r)}{E_1(t - \tau_1)} + (\mathbf{I} - \mathbf{V}_2) \frac{2(1 - \nu_2^2)}{\pi E_2(t - \tau_2)} \int_a^b k_{ax} \left(\frac{r}{H}, \frac{\rho}{H} \right) q(\rho, t) \rho d\rho = \delta(t) - g(r) \quad (a \leq r \leq b),$$

$$\mathbf{V}_k f(t) = \int_{\tau_0}^t K^{(k)}(t - \tau_k, \tau - \tau_k) f(\tau) d\tau, \quad K^{(k)}(t, \tau) = E_k(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E_k(\tau)} + C^{(k)}(t, \tau) \right], \quad k = 1, 2,$$

где $\delta(t)$ — осадка штампа, $E_k(t)$ — модуль Юнга покрытия (при $k = 1$) и нижнего слоя (при $k = 2$), ν_2 — коэффициент Пуассона нижнего слоя, $\mathbf{I}$ — тождественный оператор, $\mathbf{V}_k$ — интегральный оператор Вольтерра с ядром $K^{(k)}(t, \tau)$ ($k = 1, 2$), $C^{(k)}(t, \tau)$ — мера ползучести, θ — безразмерный коэффициент, зависящий от условий слоев ($\theta = 1 - \nu_1^2$ при гладком контакте и $\theta = (1 - \nu_1 - 2\nu_1^2)/(1 - \nu_1)$ при идеальном контакте; ν_1 — коэффициент Пуассона покрытия), $k_{ax}(r/H, \rho/H)$ — известное ядро осесимметричной контактной задачи, имеющее вид

$k_{ax}(r, \rho) = \int_0^\infty L(u) J_0(ru) J_0(\rho u) du$, в котором функция $L(u)$ зависит от условий между подстилающим недеформируемым основанием и нижним слоем ($L(u) = (2\kappa \text{sh} 2u - 4u)/(2\kappa \text{ch} 2u + 4u^2 + 1 + \kappa^2)$ при идеальном контакте и $L(u) = (\text{ch} 2u - 1)/(\text{sh} 2u + 2u)$ при

гладком контакте; $\kappa = 3 - 4\nu_2$ [1]). Интегральное уравнение следует дополнить условием равновесия штампа на слое:

$$2\pi \int_a^b q(\rho, t) \rho d\rho = P(t).$$

Смешанное интегральное уравнение и дополнительное условие могут быть приведены к безразмерному виду ($0 \leq r \leq 1$)

$$c(t)m(r)(\mathbf{I} - \mathbf{V}_1)q(r, t) + (\mathbf{I} - \mathbf{V}_2) \int_0^1 k_{ax}(r, \rho) q(\rho, t) \rho d\rho = \delta(t) - g(r), \quad \int_0^1 q(\rho, t) \rho d\rho = P(t)$$

Существует всего 2 варианта постановки осесимметричной задачи: 1) осадка штампа задана (интегральное уравнение с известной правой частью) и требуется определить контактные давления под штампом и вдавливающую силу; 2) вдавливающая сила известна и требуется найти контактные давления и осадку штампа.

Решение при известной вдавливающей силе. Введем новую неизвестную функцию и оператор

$$Q(r, t) = \sqrt{m(r)} \left[q(r, t) + (\mathbf{I} - \mathbf{V}_1)^{-1} \frac{g(r)}{c(t)m(r)} \right],$$

$$Af(r) = \int_0^1 k(r, \rho) f(\rho) \rho d\rho, \quad k(r, \rho) = \frac{k_{ax}(r, \rho)}{\sqrt{m(r)m(\rho)}}.$$

Тогда интегральное уравнение и дополнительное условие можно преобразовать к следующему интегральному уравнению с ядром Гильберта-Шмидта

$$c(t)(\mathbf{I} - \mathbf{V}_1)Q(r, t) + (\mathbf{I} - \mathbf{V}_2)AQ(r, t) = \frac{\delta(t)}{\sqrt{m(r)}} - \frac{\tilde{c}(t)\tilde{g}(r)}{\sqrt{m(r)}}, \quad \int_0^1 \frac{Q(\rho, t)}{\sqrt{m(\rho)}} \rho d\rho = \tilde{P}(t),$$

$$\tilde{g}(r) = \int_0^1 \frac{k_{ax}(r, \rho)g(\rho)}{m(\rho)} \rho d\rho, \quad \tilde{c}(t) = (\mathbf{I} - \mathbf{V}_2)(\mathbf{I} - \mathbf{V}_1)^{-1} \frac{1}{c(t)},$$

$$\tilde{P}(t) = P(t)(\mathbf{I} - \mathbf{V}_1)^{-1} \frac{1}{c(t)} \int_0^1 \frac{g(\rho)}{m(\rho)} \rho d\rho.$$

Решение полученного интегрального уравнения следует искать в классе функций, непрерывных по времени t в гильбертовом пространстве $L_2(0, 1)$. Для этого в первую очередь необходимо построить ортонормированный базис $\{p_0(r), p_1(r), p_2(r), \dots\}$ пространства $L_2(0, 1)$, который получается после ортонормирования системы линейно независимых функций $\{1/\sqrt{m(r)}, r/\sqrt{m(r)}, r^2/\sqrt{m(r)}, \dots\}$.

Затем для решения интегрального уравнения следует применить обобщенный проекционный метод А.В. Манжирова [2, 3]. Окончательное решение имеет следующую структуру

$$q(r, t) = \frac{1}{m(r)} [z_0(t)P_0(r) + \dots] - (\mathbf{I} - \mathbf{V}_1)^{-1} \frac{1}{c(t)} \frac{g(r)}{m(r)},$$

в которой функция, стоящая в квадратных скобках, является суммой многочленов, а функции, связанные с толщиной покрытия и зазором, выделены отдельными сомножителями и слагаемыми. Полученная формула позволяет производить эффективные вычисления для случаев, когда формы контактирующих поверхностей описываются сложными и быстро изменяющимися функциями.

Также можно получить аналитическую формулу для вычисления функции осадки штампа.

Заключение. Поставлена и решена осесимметричная задача о контакте вязкоупругого стареющего основания с шероховатым покрытием и жесткого штампа в случае, когда контактирующие поверхности описываются быстро изменяющимися функциями. Решение

построено в аналитическом виде, причем в выражениях для контактных давлений функции форм покрытий выделены отдельными слагаемыми и сомножителями, что позволяет производить эффективные вычисления, когда контактирующие поверхности несогласованы и имеют сложную форму.

Благодарности. Автор благодарит А.В. Манжирова за постановку задачи, полезные обсуждения и ценные советы. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-01-00770 и № 18-01-00920.

Литература

1. Manzhirov A.V. On a method of solving two-dimensional integral equations of axisymmetric contact problems for bodies with complex rheology // J Appl Math Mech. 1985. Vol. 49. No. 6. P. 777–782.
2. Manzhirov A.V. A mixed integral equation of mechanics and a generalized projection method of its solution // Dokl Phys. 2016. Vol. 61. No. 10. P. 489–493.
3. Manzhirov A.V. Integral equations with several different operators and their application to mechanics // Lecture Notes in Engineering and Computer Science. 2016. Vol. 2224. No. 1. P. 10–15.

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МАТРИЦЫ УПРУГОЙ ЗАДЕЛКИ ДЛЯ ЗАДАЧИ ОБ ОТСЛОЕНИИ ТОНКОЙ ПОЛОСЫ ОТ ПОЛУПЛОСКОСТИ

Каспарова Е.А.

ИПМех РАН

E-mail: korserpentis@mail.ru

В настоящей работе с помощью метода конечных элементов выполнены расчеты элементов расширенной матрицы коэффициентов упругой заделки для задачи об отслоении тонкой полосы от полуплоскости. Полученные результаты совпадают с аналитическими оценками.

Введение. Изучение механических свойств систем «покрытие-подложка» представляет большой теоретический и практический интерес в связи с тем, что подобного рода системы довольно часто встречаются как типичные элементы конструкции микроэлектронных и микромеханических устройств, биологических структур.

В процессе эксплуатации в таких системах могут возникать остаточные сжимающие напряжения, обусловленные, к примеру, отличием температурных коэффициентов линейного расширения подложки и покрытия, которые могут приводить к нарушению адгезионной прочности на границе раздела и, как следствие, отслоению покрытия [1]. При этом основания отслоившихся участков покрытия могут принимать различные формы [2].

Методы. Моделирование отслоения покрытия для двухмерного случая, как правило, выполняют с помощью балочного приближения. При этом, отслоившийся участок покрытия, не контактирующий с основанием, рассматривается отдельно и моделируется с использованием нелинейной теории пластин Кармана, а решение задачи об основании и покрытии (без отслоившегося участка, см. Рис. 1) получают с помощью интегральных уравнений [3]. Затем оба решения сшивают по краям пластины исходя из требования непрерывности перемещений [4].

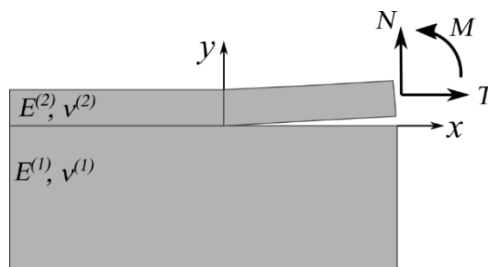


Рис.1. Схема к постановке задачи

В качестве граничных условий для первой и второй задач выбирают главный момент и главный вектор действующих усилий, причем в работах [5, 6] было показано, что в общем случае необходимо учитывать все компоненты главного вектора усилий. При этом, значения горизонтальной и вертикальной компонент смещений u_0, v_0 и начального угла поворота v'_0 в точке упругой заделки зависят от главного вектора и изгибающего момента линейным образом [6]:

$$E^{(2)} \begin{pmatrix} u_0 \\ v'_0 \\ v_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{uT} & K_{uM} & K_{uN} \\ K_{vT} & K_{vM} & K_{vN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T \\ M + LN \\ N \end{pmatrix} \quad (3)$$

где L - длина отслоившегося покрытия, $E^{(2)}$ - упругий модуль материала покрытия, который связан с модулем Юнга $E_0^{(2)}$ и коэффициентом Пуассона $\nu_0^{(2)}$ соотношениями

$$E^{(2)} = \frac{E_0^{(2)}}{(1 - \nu_0^{(2)})(1 + \nu_0^{(2)})}, \quad \nu^{(2)} = \frac{\nu_0^{(2)}}{(1 - \nu_0^{(2)})} \quad (4)$$

Интегральные формулы для компонентов расширенной матрицы коэффициентов упругой заделки, входящей в формулу (1), получены в работе [7] путем решения матричной задачи

Римана для тонкой полосы, контактирующей с основанием из другого материала вдоль части своей границы (Рис. 1).

С учетом граничных условий (1), можно получить выражения для компонент смещений u, v и поворота v' тонкой полосы под действием нагрузки, представленной на Рис.1:

$$E^{(2)}u(x) = \frac{T}{S}x + K_{uT}T + K_{uM}(M + NL) + K_{uN}N$$

$$E^{(2)}v(x) = -\frac{N}{6I}x^3 + \frac{1}{2I}(M + NL)x^2 + (K_{vT}T + K_{vM}(M + NL) + K_{vN}N)x +$$

$$+ K_{vT}T + K_{vM}(M + NL) + K_{vN}N$$
(5)

где S, I - площадь поперечного сечения и момент инерции полосы соответственно [7].

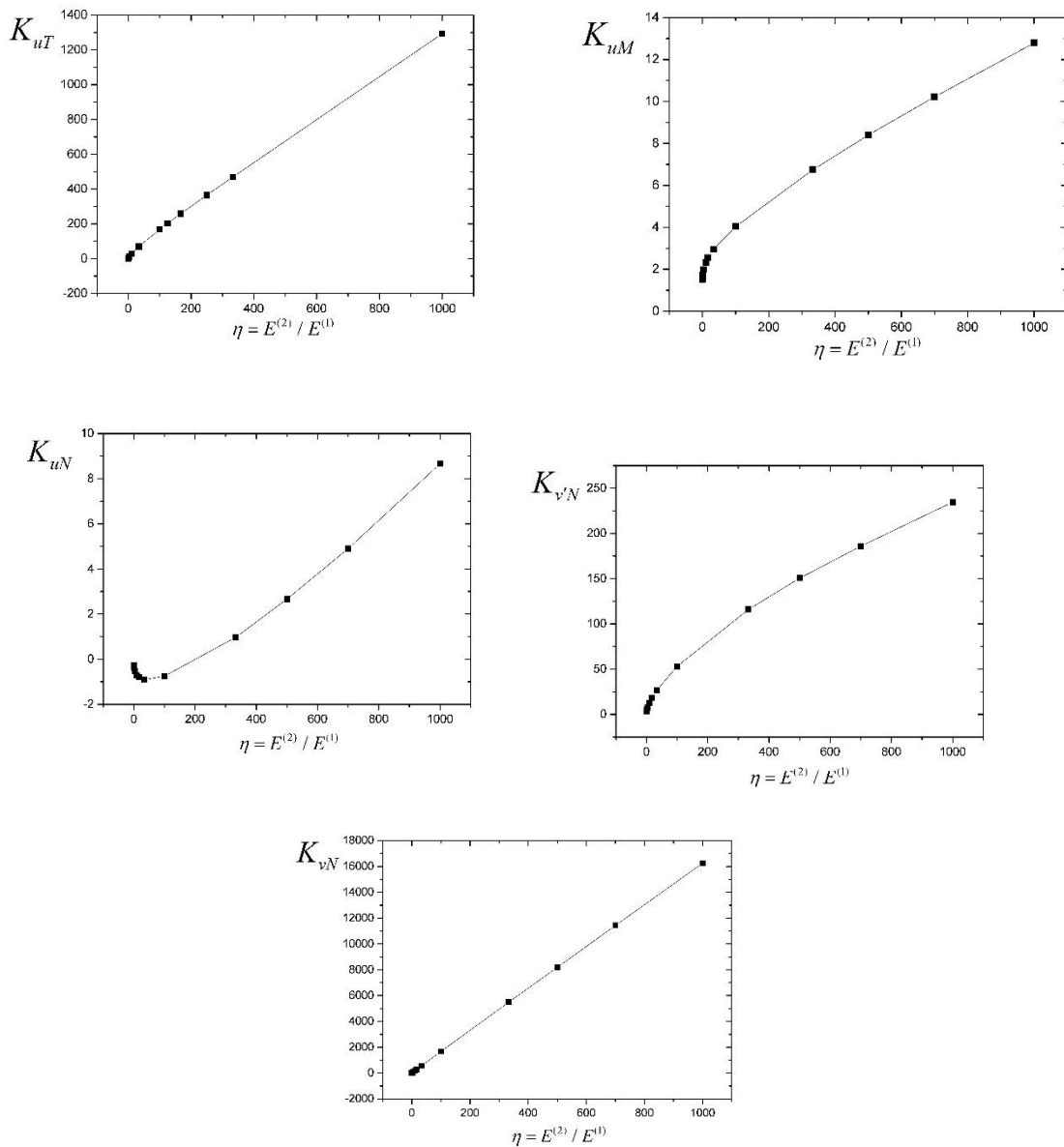


Рис.2. Графики зависимостей коэффициентов упругой заделки от отношения упругих модулей основания и покрытия

В настоящей работе с помощью метода конечных элементов для случая плоской деформации выполнено моделирование рассматриваемой задачи, представленной на Рис.1, причем в качестве нагрузки поочередно задавался момент M , растягивающая T и

перерезывающая N силы. Из формул (5) видно, что, вычисляя $u(x)$ и $v(x)$ для трех различных способов нагружения, можно получить коэффициенты упругой заделки, совместно входящие в формулы (5).

На Рис. 2 представлены результаты численных расчетов – графики зависимостей полученных коэффициентов от отношения упругих модулей основания и покрытия. Расчеты выполнены для покрытия единичной толщины и единичной площади поперечного сечения, ширина основания намного больше ширины покрытия. По графикам видно, что коэффициенты упругой заделки уменьшаются по мере увеличения жесткости основания (кроме K_{uN}).

Необходимо отметить, что в работах [4, 7] было показано, что из теоремы взаимности работ Бетти следует симметрия матрицы (1), таким образом, существует только шесть независимых компонент матрицы.

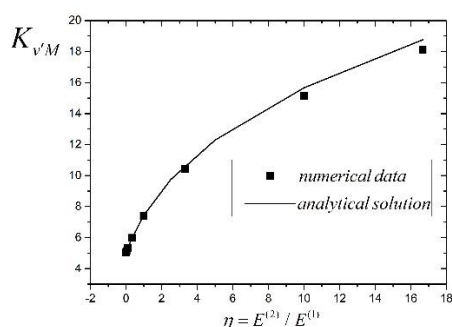


Рис.3. Сравнение численных и аналитических расчетов коэффициента $K_{v'M}$ для различных значений отношения упругих модулей основания и покрытия

Выполнено сравнение численных результатов с асимптотическими оценками, полученными в работе [7]. Как видно по графику (Рис.3), результаты численных и аналитических расчетов хорошо согласуются при небольших значениях отношения η (т.е. в случае более жесткого основания).

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 17-01-00526.

Литература

1. Гольдштейн Р.В., Устинов К.Б., Ченцов А.В. Оценка влияния податливости подложки на напряжения потери устойчивости отслоившегося покрытия. Вычислительная механика сплошных сред. – 2011. – Т. 4, № 3. – С. 48-57.
2. Hutchinson J.W., Suo Z. Mixed mode cracking in layered materials // Adv. Appl. Mech. – 1991. – Vol. 29. – P. 147-167.
3. Салганик Р.Л., Устинов К.Б. Задача об упруго заделанной пластине, моделирующей частично отслоившееся от подложки покрытие (плоская деформация) // Изв. РАН. МТТ. – 2012. – №4. – С. 50-62.
4. Yu H.-H., Hutchinson J.W. Influence of substrate compliance on buckling delamination of thin films // Int. J. Fract. – 2002. – Vol.113. – P. 39-55.
5. Thouless M.D. The Effect of Transverse Shear on the Delamination of Edge-Notch Flexure and 3-Point Geometries // Journal of Composites B. – 2009. – Vol.40. – P. 305-312.
6. Устинов К.Б. Еще раз к задаче о полуплоскости, ослабленной полубесконечной трещиной, параллельной границе // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2013. – №4. – С. 138-168.
7. Устинов К.Б. Об отслоении слоя от полуплоскости; условия упругой заделки для пластины, эквивалентной слою // Изв. РАН. МТТ. – 2015. – № 1. – С. 75-95.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТИЦ SiC НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК12 МЕТОДАМИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И СИЛОВОЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Климова Т. Ю., Ледяев М. Е., Чаплыгин К.К.

Научный руководитель — доцент, к.т.н. Воронин С. В.

Самарский университет

E-mail: sillmarllion@mail.ru

Методом зондовой микроскопии исследован фазовый состав алюмоматричного композиционного материала. Определены значения модулей упругости основных фазовых составляющих. На основе полученных данных проведено конечно-элементное моделирование, в результате которого получены эпюры распределения напряжений и деформаций.

Введение. Технология получения композиционного материала определяет характер распределения фаз, от которого зависят свойства материала. Традиционно для определения свойств разрабатываемого материала создают множество опытных образцов и проводят большое количество испытаний. Целесообразно определять механические характеристики материала не на реальных образцах, а используя методики компьютерного моделирования, основанные на методе конечных элементов. Конечно-элементная модель композита АК12+0,06%SiC позволяет оценить поведение материала в процессе деформирования, определить напряженное состояние и механические свойства получаемого материала [1]. Поэтому целью данного исследования является разработка конечно-элементной модели композиционного алюмоматричного материала АК12+0,06%SiC с учетом структурных составляющих.

Методы. Выявление мелкодисперсных включение частиц карбида кремния осуществлялось методом наноиндентирования при помощи сканирующего нанотвердомера «НаноСкан-3D». Первоначально шлифованный на фетровом круге образец композиционного материала АК12+0,06%SiC методом электролитической полировки вытравливался до выявления микроструктуры. Образец помещался на предметный столик сканирующего нанотвердомера «НаноСкан-3D». После этого производилось сканирование поверхности образца со скоростью 15 мкм/сек и с шагом 1 мкм. При помощи сканирования была получена карта профиля поверхности исследуемого образца.

Далее производилось измерение модуля упругости каждой фазы на исследуемом участке. Измерение происходило методом снятия кривых подвода индентора к поверхности образца. В каждую фазу производилась серия подводов. Количество подводов определялось размером фазы. В ходе измерения было установлено, что модуль упругости для α -твердого раствора составлял 63-79 ГПа, а для эвтектики 80-91 ГПа. Однако, в зоне эвтектической фазы встречались значения модуля упругости намного выше, равные 380-410 ГПа. Предполагается, что это включения карбида кремния, которые невозможно было обнаружить визуально.

Для проверки полученных результатов, эксперимент был повторно проведен на образце сплава АЛ2, обладающим аналогичным химическим и фазовым составом АК12, но в который частицы карбида кремния не вводились. Так же исследование сплава АЛ2 позволяло проверить достоверность данных по модулям упругости, полученным для фаз в композиционном материале АК12+0,06%SiC.

Для выявления структуры образец сплава АЛ2 подготавливался, при тех же режимах электролитического травления, что и композиционный материал АК12+0,06%SiC. Сканирование производилось на аналогичной скорости и шаге, что и для образца композиционного материала.

В ходе измерения модуля упругости фаз образца сплава АЛ2 было установлено, что значения модуля упругости α -твердого раствора сплава АЛ2 составляет 64-79 ГПа, для эвтектики 81-90 ГПа. Для эвтектики, находящейся в узком пространстве между дендридами α -твердого раствора значения модуля упругости составляет 110-147 ГПа. Это связано с тем, что в данных местах находятся иглы нерастворенного кремния.

Конечно-элементная модель материала строилась в двухмерной постановке. Первым этапом для построения конечно-элементной модели образца композита АК12+0,06%SiC являлось получение растрового изображения микроструктуры материала с помощью сканирующего нановердомера «НаноСкан-3D». Дальнейшая обработка изображения микроструктуры исследуемого материала выполнялась с помощью графических редакторов. При помощи конвертеров переводилось растровое изображение микроструктуры исследуемого материала в векторное. Таким образом четкие границы фаз конвертировались в геометрические векторные линии. После применения конвертера, полученное векторное изображение микроструктуры исследуемого материала импортировалось в программу конечно-элементного анализа MSC.Marc. В процессе разбиения векторного изображения микроструктуры на конечные элементы задавались границы разбиения и механические свойства фаз.

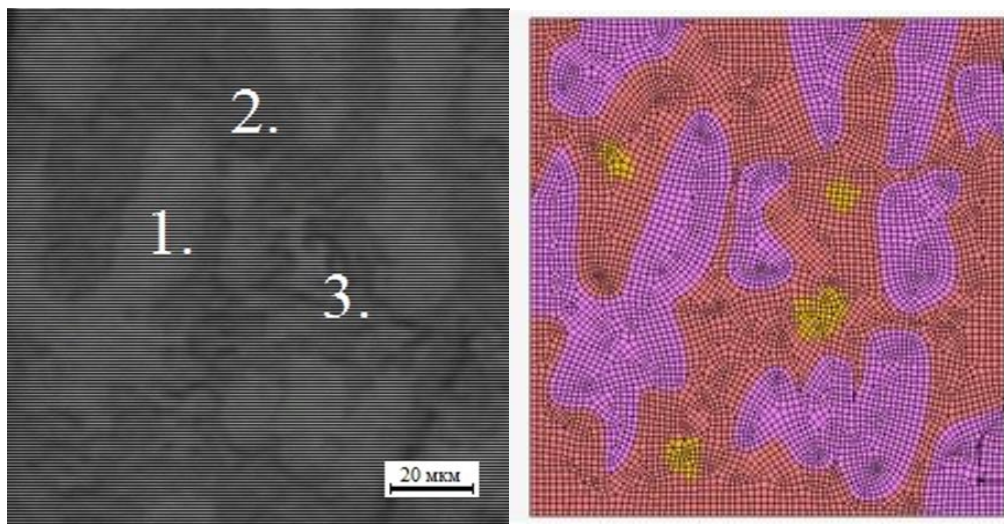


Рис. 1. Растровое изображение (слева) и конечно-элементная модель (справа) микроструктуры композиционного алюмоматричного материала АК12+0,06%SiC (1 – α -твердый раствор, 2 – эвтектика, 3 – включения карбида кремния)

Растяжение является наиболее распространенным видом деформации. Процесс деформации конечно-элементной модели материала АК12+0,06%SiC изучался при растяжении в пластической области. К конечно-элементной модели исследуемого материала прикладывались одноосные растягивающие усилия, вызывающие напряжения величиной 150 МПа – для исследования процессов, происходящих при пластических деформациях.

В результате проведенного конечно-элементного анализа была получена эпюра распределения напряжений и деформаций. При анализе эпюры напряженно-деформированного состояния конечно-элементной модели материала выявлены поля повышенных напряжений, обусловленные скоплением упрочняющих фаз карбида кремния. Это позволяет сделать предположение, что данные зоны являются возможными очагами зарождения трещины и разрушения материала.

Литература

1. Voronin, S.V. Research into the Structure of Aluminum Matrix Composite АК12+2.38%Cu+0.06%SiC with a Scanning Probe Microscope [Текст] / S.V. Voronin, K.K. Chaplygin, A.D. Litoshina, S.V. Kononov // Solid State Phenomena. – Vol. 265. – 2017. – P. 723-727.

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Комарова М.А.^{1,2}, Лисовенко Д.С.^{1,2}, Городцов В.А.¹

¹ ИПМех РАН,

² РАНХиГС

E-mail: mk.komarova@mail.ru

Изучена изменчивость упругих характеристик гексагональных кристаллов. Получены выражения экстремальных значений модуля Юнга, коэффициента Пуассона и модуля сдвига. Предложены классификационные схемы экстремальных значений для модуля Юнга, коэффициента Пуассона и модуля сдвига. На основе экспериментальных данных из справочника Ландолта-Бернштейна дан численный анализ этих упругих характеристик для гексагональных кристаллов.

Введение. В современном материаловедении активно стали использовать наноматериалы, которые изготовлены из анизотропных монокристаллов. Упругие характеристики (модуль Юнга, коэффициент Пуассона и модуль сдвига) анизотропных материалов зависят от ориентации испытываемых образцов.

Такие упругие характеристики кристаллов при одноосном растяжении и сдвиге, как модуль Юнга $E(\mathbf{n})$, коэффициент Пуассона $\nu(\mathbf{n}, \mathbf{m})$ и модуль сдвига $G(\mathbf{n}, \mathbf{m})$ зависят от единичного вектора $\mathbf{n}$ и ортогонального ему единичного вектора $\mathbf{m}$, характеризующих направление деформирования кристалла:

$$\frac{1}{E(\mathbf{n})} = s_{ijkl} n_i n_j n_k n_l, \quad \frac{\nu(\mathbf{n}, \mathbf{m})}{E(\mathbf{n})} = -s_{ijkl} n_i n_j m_k m_l, \quad \frac{1}{4G(\mathbf{n}, \mathbf{m})} = s_{ijkl} n_i m_j n_k m_l. \quad (1)$$

Упругость гексагональных кристаллов может характеризоваться пятью матричными коэффициентами податливости s_{11} , s_{12} , s_{13} , s_{33} , s_{44} . При описании ориентации растягиваемого кристаллического стержня в кристаллографической системе координат тремя углами Эйлера φ , θ , ψ выражения модуля Юнга E , коэффициента Пуассона ν и модуля сдвига G принимают следующий вид [1-3]

$$\frac{1}{s_{11}E} = 1 + (\Pi_1 - \Pi_{01} \sin^2 \theta) \cos^2 \theta, \\ -\frac{\nu}{s_{13}E} = 1 + (\Pi_2 \sin^2 \psi + \Pi_{02} \cos^2 \theta \cos^2 \psi) \sin^2 \theta, \quad (2)$$

$$\frac{1}{s_{44}G} = 1 + (\Pi_3 \sin^2 \psi + 4\Pi_{03} \cos^2 \theta \cos^2 \psi) \sin^2 \theta, \\ \Pi_{01} \equiv \frac{\delta}{s_{11}}, \quad \Pi_{02} \equiv \frac{\delta}{s_{13}}, \quad \Pi_{03} \equiv \frac{\delta}{s_{44}}, \\ \Pi_1 \equiv \frac{s_{33} - s_{11}}{s_{11}}, \quad \Pi_2 \equiv \frac{s_{12} - s_{13}}{s_{13}}, \quad \Pi_3 \equiv \frac{2s_{11} - 2s_{12} - s_{44}}{s_{44}}, \quad (3)$$

$$\delta \equiv s_{11} + s_{33} - 2s_{13} - s_{44}.$$

Модуль Юнга зависит лишь от одного угла Эйлера θ (не зависит от двух других углов), а коэффициент Пуассона и модуль сдвига оказываются зависящими от двух углов Эйлера θ , ψ и не зависят от третьего угла φ . Безразмерные комплексы Π_{0n} , Π_n и размерный параметр δ являются характеристиками степени анизотропии гексагональных кристаллов. Зависимости обсуждаемых модулей и коэффициента Пуассона являются периодическими функциями угловых переменных с периодами $T_\theta = T_\psi = \pi$.

В работе исследована изменчивость модуля Юнга, коэффициента Пуассона и модуля сдвига для гексагональных кристаллов. Получены выражения для трех экстремальных значений модуля Юнга и модуля сдвига, восьми стационарных значений коэффициента Пуассона, а также условия, при которых данные значения будут являться максимумами или минимумами. На основе экспериментальных данных из справочника Ландолта-Бернштейна дан численный анализ экстремумов упругих характеристик для 143 гексагональных

кристаллов. Проведенный анализ показал, что у 27 гексагональных кристаллов отсутствует одно из экстремальных значений, т.е. у этих кристаллов имеется только два экстремальных значения. Выявлено, что наибольшая разница между максимальным и минимальным значением модуля Юнга и модуля сдвига обнаруживается у слоистого кристалла - графита.

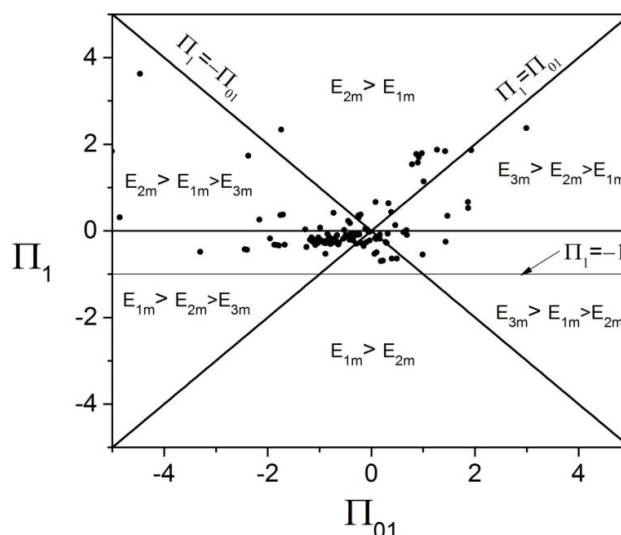


Рис.1. Классификационная схема экстремальных значений модуля Юнга гексагональных кристаллов в зависимости от безразмерных параметров Π_{01} и Π_1 . Кругами отмечены значения безразмерных параметров Π_{01} и Π_1 для 143 гексагональных кристаллов из [4].

E_{1m} E_{2m} , E_{3m} - экстремальные значения модуля Юнга

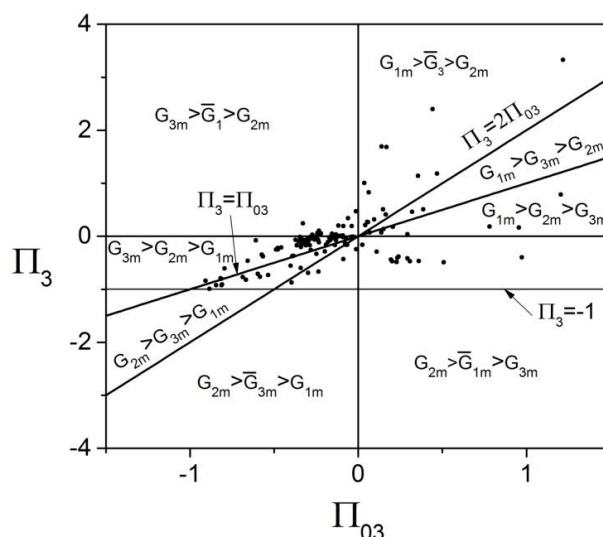


Рис.2. Классификационная схема экстремальных значений модуля сдвига гексагональных кристаллов в зависимости от безразмерных параметров Π_{03} и Π_3 . Кругами отмечены значения безразмерных параметров Π_{03} и Π_3 для 143 гексагональных кристаллов из [4].

$\bar{G}_n$ - значения модуля сдвига в стационарных точках, не являющихся экстремальными значениями. G_{1m} G_{2m} , G_{3m} - экстремальные значения модуля сдвига

Предложены классификационные схемы для экстремальных значений модуля Юнга (Рис.1), модуля сдвига (Рис.2) и трех стационарных значений коэффициента Пуассона (Рис.3) гексагональных кристаллов в зависимости от безразмерных параметров. На классификационной схеме выделено шесть зон с различными неравенствами между

экстремальными значениями модуля Юнга и восемь зон для экстремальных значений модуля сдвига. Квалификационная схема для трех стационарных значений коэффициента Пуассона разделена на шесть с различными неравенствами между стационарными значениями.

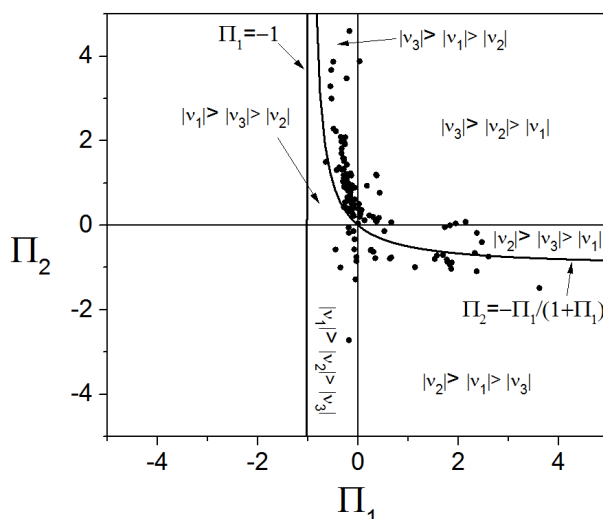


Рис.3. Классификационная схема экстремальных значений коэффициента Пуассона гексагональных кристаллов в зависимости от безразмерных параметров Π_1 и Π_2 .

Кружками отмечены значения безразмерных параметров Π_1 и Π_2 для 143 гексагональных кристаллов из [2]. ν_1, ν_2, ν_3 - экстремальные значения коэффициента Пуассона

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-01-00325 и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН I.2.32.

Литература

1. Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С. Изменчивость упругих свойств гексагональных ауксетиков. ДАН, 2011 г., Т.441, N 4, С.468-471.
2. Goldstein R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S. The elastic properties of hexagonal auxetics under pressure. Physica Status Solidi B, 2016, V.253, N 7, P.1261-1269.
3. Goldstein R.V., Gorodtsov V.A., Komarova M.A., Lisovenko D.S. Extreme values of the shear modulus for hexagonal crystals. Scripta Materialia, 2017, V.140, P.55-58.
4. Nelson D.F. (Ed.), Second and Higher Order Elastic Constants, Vol. 29a of Landolt-Börnstein - Group III Condensed Matter, Springer, 1992.

ОБРАЗОВАНИЕ ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ПЕТЛИ НЕСООТВЕТСТВИЯ В КОМПОЗИТНОЙ ДЕКАЭДРИЧЕСКОЙ НАНОЧАСТИЦЕ

Кравченко М. Ю., Красницкий С. А.

Научный руководитель – профессор, д.ф.-м.н. Гуткин М. Ю.

Университет ИТМО, Факультет лазерной и световой инженерии, Кафедра Световых технологий и оптоэлектроники

E-mail: maryia.krauchanka@gmail.com

Металлические наночастицы находят различное применение в авиации, биомедицине, сенсорных устройствах, фотонике и плазмонике. Среди металлических наночастиц, имеющих гранецентрированную кубическую кристаллическую решетку, выделяют особый класс частиц с осями симметрии пятого порядка, возникающими в результате пятикратного циклического двойникования [1-3]. Речь идет о так называемых «многократно-двойникованных» или «пентагональных» наночастицах. Декаэдрические наночастицы, простейшие из них, имеют одну ось симметрии пятого порядка. Большое внимание привлекают, в частности, декаэдрические композитные наночастицы типа «ядро-оболочка» [4], из-за своей высокой каталитической активности. В таких композитных наночастицах формируются высокие остаточные механические напряжения, вызванные упругими деформациями, характерными для пентагональных частиц, и несоответствием решеток материалов ядра и оболочки, что приводит к значительной запасенной упругой энергии этих наночастиц. По мере роста такой частицы ее упругая энергия быстро возрастает пропорционально ее объему и при некоторых условиях может релаксировать за счет образования различных дефектов решетки, поля напряжений которых частично компенсируют имеющиеся в наночастице остаточные напряжения. На данный момент не существует аналитического описания механизмов релаксации рассматриваемых наночастиц, однако известно об экспериментальных наблюдениях дефектных структур, возникающих в результате таких релаксационных процессов [5].

В настоящей работе теоретически анализируется релаксация напряжений в декаэдрической композитной наночастице типа «ядро-оболочка» путем образования круговой призматической дислокационной петли несоответствия (ПДПН). Начальное напряженное состояние представлено в виде суперпозиции упругих полей аксиально расположенной в наночастице положительной клиновой дисклинации мощностью $7^{\circ}20'$ [6] и упругих полей, обусловленных несоответствием решеток материалов ядра и оболочки. При таком подходе задача представляет собой комбинацию уже решенных задач для зарождения подобных дислокационных петель в монокристаллических наночастицах типа «ядро-оболочка» [7] и в однородных декаэдрических наночастицах [8]. Используя этот подход, мы проанализировали изменение полной энергии в декаэдрической композитной наночастице типа «ядро-оболочка», сопровождающее образование ПДПН на границе ядра и оболочки в приближении равных и изотропных модулей упругости их материалов. Было определено такое критическое значение параметра решеточного несоответствия, при превышении которого появление ПДПН становится энергетически выгодным. При заданной величине параметра несоответствия, превышающей это критическое значение, можно определить два критических значения приведенного радиуса ядра наночастицы, в пределах которых зарождение ПДПН энергетически выгодно. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными для декаэдрических композитных наночастиц, состоящих из платиновых ядер и палладиевых оболочек [4]. При варьировании таких параметров материала, как энергия дислокационного ядра и коэффициент Пуассона, можно достичь как большей, так и меньшей устойчивости рассматриваемых частиц к зарождению ПДПН. Во всех этих случаях при заданном значении параметра несоответствия можно определить значение оптимального радиуса ядра в зависимости от размера частицы.

Литература

1. Gryaznov V.G., Kaprelov A.M., Romanov A.E., Polonskii L.A. Channels of relaxation of elastic stresses in pentagonal nanoparticles. Phys. stat. sol. (b). 1991. Vol.167. № 2. P. 441-450

2. Yacaman M.J., Ascencio J.A., Liu H.B., Gardea-Torresdey J. Structure shape and stability of nanometric sized particles J. Vac. Sci. Technol. B. 2001. Vol. 19. P. 1091-1103
3. Koga K., Sugawara K. Population statistics of gold nanoparticle morphologies: direct determination by HREM observations. Surf. Sci. 2003. Vol. 529. P. 23-35; Marks L.D., Peng L. Nanoparticle shape, thermodynamics and kinetics. J. Phys.: Condensed Matter. 2016. Vol. 28. P. 053001
4. Bhattarai N., Khanal S., Velazquez-Salazar J.J., Jose-Yacaman M. Advanced Electron Microscopy in the Study of Multimetallic Nanoparticles. Springer. 2015
5. Ding Y., Sun X., Wang Z.L., Sun S. Misfit dislocations in multimetallic core-shelled nanoparticles. Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 100. P. 111603
6. Kolesnikova A.L., Gutkin M.Yu., Proskura A.V., Morozov N.F., Romanov A.E. Elastic fields of straight wedge disclinations axially piercing bodies with spherical free surfaces. Int. J. Solids Structures. 2016. Vol. 99. P. 82-96
7. Gutkin M.Yu., Kolesnikova A.L., Krasnitskiy S.A., Romanov A.E. Misfit Dislocation Loops in Composite Core–Shell Nanoparticles. Phys. Solid State. 2014. Vol. 56, P. 723-730
8. M.Y. Krauchanka, Krasnitskiy S.A., M.Yu. Gutkin, Kolesnikova A.L., Romanov A.E., Aifantis E.C. Generation of circular prismatic dislocation loops in decahedral small particles. Scripta Mater. 2018, Vol.146. P.77-81

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УПРУГОГО ЦИЛИНДРА С ВКЛЮЧЕНИЕМ В ВИДЕ ДЛИННОЙ ТРЕУГОЛЬНОЙ ПРИЗМЫ

Красницкий С. А., Смирнов А. М.

Научный руководитель — профессор, д.ф.-м.н. Гуткин М. Ю.

Университет ИТМО, Мегафакультет фотоники, Кафедра современных функциональных материалов

E-mail: krasnitsky@inbox.ru

Композитные нанопроволоки типа «ядро-оболочка» обладают превосходными электронными и оптическими свойствами и находят широкое применение при создании новых устройств для оптоэлектроники, фотоники и спинтроники [1,2]. Известно, что стабильность физических свойств таких структур зависит от различных структурных факторов, включая несоответствие решеток, разницу в коэффициентах температурного расширения материалов ядра и оболочки, а также присутствия дефектов на границе раздела фаз композита [3,4]. На сегодняшний день существует ряд теоретических моделей, описывающих зарождение дефектов, в частности, дислокаций несоответствия [5,6]. В этих моделях используется осесимметричное решение теории упругости для композитной нанопроволоки с цилиндрическим ядром. На самом деле ядра имеют форму многогранных призм с плоскими границами раздела [7-8]. Поэтому этот подход не позволяет учесть эффекты, связанные с концентрацией напряжений в вершинах включения. Более того, он не может быть применим для теоретического описания скольжения дислокаций вдоль плоских межфазных границ. Простейшей геометрической моделью нанопроволоки типа «ядро-оболочка» с плоскими границами раздела является упругий цилиндр с включением в виде длинного параллелепипеда.

Ранее найдено решение краевой задачи в теории упругости для упругого цилиндра с эксцентрическим включением в виде параллелепипеда прямоугольного сечения, подвергнутого собственной всесторонней дилатации [9,10]. Рассматривая суперпозицию таких включений, получены поля напряжений для упругого цилиндра с включением в виде треугольной призмы. Данное решение, удовлетворяющее уравнениям равновесия и граничным условиям на свободной поверхности цилиндра, планируется использовать для анализа физических приложений, а именно исследования критериев зарождения дислокационных дефектов в композитных нанопроволках типа «ядро-оболочка» с ядром в виде длинной треугольной призмы [7].

Литература

1. Dimakis E, Jahn U, Ramsteiner M, et al., 2014 Nano Lett. 14 2604-2609
2. Qian F, Gradecak S, Li Y, Wen C-Y and Lieber C M 2005 Nano Lett. 5 2287-2291
3. Sneed B T, Young A P and Tsung C 2015 Nanoscale 7 12248
4. Muralidharan N, Carter R, Oakes L, Cohn A P and Pint C L 2016 Scientific Reports 6 27542
5. Gutkin M Y, Ovid'ko I A and Sheinerman A G 2000 J. Phys.: Condens. Matter 12 25 5391
6. Gutkin M Y and Smirnov A M 2015 Acta Materialia 88 91-101
7. Jenichen B, Hilse M, Herfort J and Trampert A 2015 J. of Crystal Growth. 410 1-6
8. Aksoy B, Kalay Y E, and Unalan H E 2014 Journal of Crystal Growth 392 20-29
9. Krasnitskii S A, Smirnov A M and Gutkin M Y 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 690 012022
10. Krasnitskii S A, Kolomoets D R, Smirnov A M and Gutkin M Y 2017 J. Phys.: Conf. Ser. 816 012043

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗНАКОПЕРЕМЕННОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ПРЯМОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

Крутиков П. В.

Научный руководитель – профессор, д.т.н. Ларин С.Н.
ТулГУ, Механико-технологический факультет, Кафедра МПФ
E-mail: Peter212@yandex.ru

Современные методы математического моделирования и анализа процессов обработки металлов давлением дают нам возможность выбрать оптимальные скоростно-силовые и геометрические параметры операций выдавливания.

Широкое распространение осесимметричных полых стаканов и втулок с различной толщиной стенки объясняет актуальность исследований, проводимых с задачей оптимизации таких операций как выдавливание, вытяжка, ротационная вытяжка и т.д. Среди названных способов получения осесимметричных деталей выделяется операция выдавливания, а в особенности, прямого выдавливания, совмещенного со свободным истечением металла в ходе формирования внешней стенки детали. Такая схема деформирования в разы увеличивает стойкость инструмента (матрицы и пуансоны), а так же расширяет номенклатуру получаемых изделий за счет увеличения относительной высоты детали. Применяя указанную схему деформирования мы можем получать детали с относительной высотой до 7-9, а также существенно повысить износостойкость инструмента, что является актуальной задачей при внедрении новых технологических процессов в крупносерийное производство.

Знакопеременное деформирование дает существенный эффект для снижения технологической силы за счет совмещения операции осадки, раздачи и непосредственно выдавливания заготовки из матричной полости. Такой подход позволяет снизить технологическую силу на 30-40% по сравнению с аналогичной технологией, включающей в себя классическое прямое выдавливание.

Были проведены экспериментальные исследования в программных комплексах Qform 3D и Deform 3D, которые подтвердили гипотезу о снижении технологической силы за счет совмещения нескольких операций в одну. На данный момент подана и одобрена заявка на патент на изобретение нового способа холодного прямого выдавливания. Изготовлен комплект универсальной штамповой оснастки, проводятся испытания на разрывной машине Instron на базе кафедры МПФ ТулГУ. По результатам натурного эксперимента планируется создать матрицу планирования, на основе которой будут выведены необходимые зависимости для конкретного процесса получения полых осесимметричных деталей. Имеется достаточно широкий диапазон варьирования диаметров заготовки и детали (от 8 до 16 мм). Кроме того, планируются исследования с применением разных материалов для заготовки, что позволит расширить номенклатуру изделий. Совмещение метода конечных элементов и натурного эксперимента даст наиболее полное представление о характере течения металла в полости матрицы сложной формы, а применение различных размеров матриц и пуансонов позволит создать универсальные рекомендации для большого числа деталей, актуальных для авиационной отрасли промышленности.

Экономический эффект, который способна дать технология выдавливания с использованием знакопеременной схемы деформирования, является одним из ключевых факторов при внедрении подобных процессов в производство. Стоит отметить, что планируемый экспериментальный анализ изменения микроструктуры заготовки до и после деформации позволит также дополнить упомянутые исследования и найти связь между получением детали с более мелкозернистой структурой и эксплуатационными свойствами готового изделия.

ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА НА ЕГО ПРЕДЕЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ ОПЕРАЦИЯХ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Кузин А.О.

Самарский университет

E-mail: alexandrkuzin88@gmail.com

Как известно, такие широко распространенные в производстве аэрокосмической техники полуфабрикаты как листы, ленты, профили, трубы и т.д. обладают явно выраженной анизотропией свойств. Игнорирование в технологических расчетах анизотропии свойств не только снижает потенциальные деформационные возможности заготовок, но и приводит к целому ряду других нежелательных явлений: повышенному расходу металла, ограничению предельно допустимой деформации, искажению формы, размеров и снижению эксплуатационных параметров продукции. С другой стороны, рациональная анизотропия является серьезным фактором интенсификации процессов формообразования материалов и повышения эксплуатационных характеристик изделий в определенных направлениях.

Оптимальную анизотропию свойств для конкретного процесса можно определить методами компьютерного моделирования, современный уровень развития которых позволяет значительную часть работ по оценке и анализу напряженно-деформированного состояния перенести в область численного эксперимента; получить больший объем информации; провести всестороннее исследование не только процессов формообразования, но и характера поведения материала в этих процессах в зависимости от его структурного состояния; рассмотреть и сопоставить большее количество альтернативных вариантов.

Учесть кристаллографическую ориентацию структуры и сформулировать требования к ней позволяет разработанный в [1-2] критерий пластичности, особенностью которого является то, что в него в явном виде входят параметры кристаллографической ориентации структуры и константы кристаллической решетки. На основе данного критерия была разработана модель материала, что позволило проводить анализ процессов пластического деформирования с учетом кристаллографической ориентации структуры заготовок.

Используя данную модель материала, изучено влияние кристаллографической ориентации структуры материала на его предельные деформационные возможности в различных операциях листовой штамповки (формовка, вытяжка, гибка, отбортовка).

Размеры и геометрия моделей соответствуют стандартным испытаниям на выдавливание лунки по методу Эриксона, (ГОСТ 10510-80), отбортовку (ISO 16630), фестонистость (EN 1669) и изгиб с переменным радиусом по методу Гюта [3]. Во всех случаях толщина заготовки соответствует 1 мм. Конечно-элементные модели выполнены с использованием 4-х узловых оболочных конечных элементов с 5 точками интегрирования по толщине. С целью сокращения количества элементов моделировалась 1/4 объема, для гибки 1/2. Между инструментом и заготовкой задавались контактные пары, трение на которых подчиняется закону Кулона (коэффициент трения принят равным 0,12). Деформирующий инструмент принимался абсолютно жестким.

С целью оценки влияния кристаллографии структуры на штампуемость моделировался анизотропный материал, текстура которого представлена только одной идеальной кристаллографической ориентировкой. Рассмотрены наиболее характерные для листового проката ориентировки деформационного типа: медь $\{112\}\langle 111 \rangle$, латунь $\{110\}\langle 112 \rangle$, S $\{123\}\langle 634 \rangle$, куб на ребре $\{100\}\langle 011 \rangle$; и рекристаллизационного типа: куб $\{100\}\langle 001 \rangle$ и Госс $\{110\}\langle 001 \rangle$.

В данной работе приведены параметры процессов формовки, отбортовки, вытяжки и гибки в момент начала разрушения ($\psi=0,9$). Из представленных данных видно, что максимальные деформационные возможности материала (максимальная глубина лунки, коэффициент отбортовки, глубина стаканчика, радиусгиба) обеспечивает идеальная кристаллографическая ориентировка $\{100\}\langle 011 \rangle$; минимальную - $\{110\}\langle 001 \rangle$. При этом некоторые компоненты текстуры обеспечивают лучшую штампуемость по сравнению с изотропным случаем ($\{100\}\langle 011 \rangle$), а некоторые худшую ($\{100\}\langle 001 \rangle$, $\{110\}\langle 001 \rangle$) или

близкую к изотропии ($\{112\}\langle 111\rangle$, $\{110\}\langle 112\rangle$, $\{123\}\langle 634\rangle$).

Таким образом, при разработке термомеханических режимов производства листов из алюминиевых сплавов, в том числе алюминий-литиевых, необходимо назначать согласованные режимы прокатки и промежуточной термической обработки (отжига), т.к. только сочетание различных идеальных кристаллографических ориентировок деформационного и рекристаллизационного типов может обеспечить повышение деформационных возможностей в технологических процессах обработки металлов давлением. При этом для каждого конкретного процесса формообразования состав компонент текстуры будет индивидуальным.

Литература

1. Erisov, Y.A., Grechnikov, F.V., Surudin, S.V. Yield function of the orthotropic material considering the crystallographic texture // Structural Engineering and Mechanics, 58 (4). 2016. P. 677-687.
2. Grechnikov, F.V., Erisov, Y.A. Virtual material model with the given crystallographic orientation of the structure // Key Engineering Materials. 684. 2016. P. 134-142.
3. Аверкиев, А.Ю. Методы оценки штампуемости листового металла // А.Ю. Аверкиев. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.

ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧНОСТЬ МЕТАЛЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Кукуджанов К.В.¹, Кузнецов С.Н.², Ченцов А.В.¹, Макеев Е.В.¹,
Сайфутдинов Ю.Н.¹

¹ ИПМех РАН,

² МАИ, Институт №11, Кафедра физики конструкционных материалов

E-mail: kconstantin@mail.ru

Электропластичность (уменьшение предела текучести материала или увеличение предельной пластической деформации до разрушения) наблюдается, если электромагнитное поле индуцирует в материале ток с плотностью тока от 10^8 до 10^{11} А/м² в течение достаточно короткого интервала времени продолжительностью до нескольких 100 мкс. Рассеянная в течение указанного интервала времени удельная электромагнитная энергия в материале оказывается находящейся в диапазоне $10^6 \leq e \leq 10^{10}$ Дж/м³. При этом будем называть поле импульсным высокоэнергетическим электромагнитным полем (ВЭМП), если при таком воздействии рассеянная удельная электромагнитная энергией в материале находится в диапазоне $10^8 \leq e \leq 10^{10}$ Дж/м³.

При протекании тока в металле происходит рассеяние свободных электронов ионами кристаллической решетки, в процессе которого выделяется тепловая энергия (джоулево тепло). При этом, не вызывает сомнения, что это тепловыделение в областях с дефектами структуры материала (дислокациями, микротрещинами, включениями-примесями) и в областях, где такие дефекты отсутствуют, происходит по-разному. Моделирование показывает, что это является причиной процессов заживления микродефектов в поликристаллическом металле.

В работе проводится микромоделный анализ процессов, протекающих в металле при воздействии импульсного электромагнитного поля на дефекты структуры материала, такие как дислокации, микротрещины и микропоры, а также поиск на основе проведенного микромоделного анализа связи между параметрами, описывающими макроскопическое поведение металла при воздействии ВЭМП.

Известно, что дислокации обладают «легкой» подвижностью, т.е. требуются сравнительно небольшое касательное напряжение, чтобы, например, краевая дислокация начала перемещаться в кристаллите (зерне). На основе специально разработанной математической модели показано, что для того чтобы привести в движение границы микродефектов, требуется рассеять в единице объема материала электромагнитную энергию на два порядка большую по величине, чем для инициирования электронно-дислокационного взаимодействия и приведения в движение дислокаций. При этом величина «пороговой» рассеянной удельной энергии, необходимой для того чтобы дефекты начали заживаться, хорошо согласуется с величиной рассеянной удельной энергии, необходимой для начала процесса электропластического деформирования, полученной в экспериментах по воздействию ВЭМП на материалы.

На основе проведенного для межзеренных и внутризеренных микротрещин микромоделного анализа получена макроскопическая зависимость изменения поврежденности металла от рассеянной в нем удельной электромагнитной энергии импульсного ВЭМП и «длины» микротрещины.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00958).

Литература

1. Кукуджанов К.В. «Моделирование воздействия высокоэнергетического импульсного электрического поля на микротрещины в поликристаллическом металле» Вестник ПНИПУ, Механика №4, 2015г. С. 138-158.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВУМЕРНОЙ АУКСЕТИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ

Лаврентьев С.Ю., Лисовенко Д.С., Ченцов А.В.

ИПМех РАН

E-mail: 1993serj@gmail.com

В работе экспериментально исследовано механическое поведение двумерной ауксетической конструкции (конструкции с отрицательным коэффициентом Пуассона). В результате анализа полученных экспериментальных данных была построены диаграммы растягивающая сила – перемещение и изменения поперечного смещения в зависимости от продольного смещения, а также исследована изменчивость коэффициента Пуассона в зависимости от инженерных деформаций.

Введение. Коэффициент Пуассона характеризует отношения относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению. При положительном коэффициенте материалы сжимаются в поперечном направлении, а при отрицательном коэффициенте Пуассона расширяются. Материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона называются ауксетиками.

На данный момент в исследовании ауксетиков можно выделить следующие основные направления: построение ауксетических стержневых моделей и структур [1-6], получение композитов с эффективным отрицательным коэффициентом Пуассона [5,7], исследование ауксетических кристаллических материалов [5,8-10]. Ауксетические стержневые модели и структуры могут использоваться как элементы нового класса композитов.

Методы. В работе экспериментально исследовано механическое поведение двумерной конструкции с отрицательным коэффициентом Пуассона. В ауксетических конструкциях часто структурным элементом является вогнутый шестиугольник с прямыми сторонами. В данной работе предложен новый дизайн вогнутого шестиугольника, в котором часть прямых элементов заменена на криволинейные элементы. Образец (Рис.1), размерами 110×20×0.7 мм был изготовлен из неауксетического полиэтилентерефталата (ПЭТ-а аморфный), методом лазерной обработки фемтосекундным лазером. При обработке фемтосекундным лазером практически полностью отсутствуют побочные эффекты, связанные с нагревом материала. Таким образом, механические свойства материала остаются прежними на всем образце. Поперечный размер элементов шестиугольников равен толщине образца (т.е. достигается квадратное сечение элементов). Образец был подвергнут монотонному одноосному растяжению до момента, когда он еще оставался плоским. С датчиков установки регистрировались сила и перемещения подвижной траверсы. В результате обработки экспериментальных данных построена диаграмма растягивающая сила – перемещение (Рис.2а) и диаграмма изменение поперечного смещения в зависимости от продольного смещения (Рис.2б), а также исследована изменчивость коэффициента Пуассона в зависимости от инженерных деформаций (Рис.3). Анализ показал, что в результате растяжения ауксетической конструкции максимальная продольная деформация составила (до потери устойчивости) 99%, а максимальные поперечные деформации - 59%. Упругие деформации достигают 2%. В теории упругости малых деформаций коэффициент Пуассона определяется по формуле

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}, \quad (1)$$

где ε_y - продольная деформация, ε_x - поперечная деформация.

Коэффициент Пуассона, определенный по аналогии с упругими малыми деформациями, меняется в интервале от -0.19 до -0.60 при увеличении продольных и поперечных деформаций.

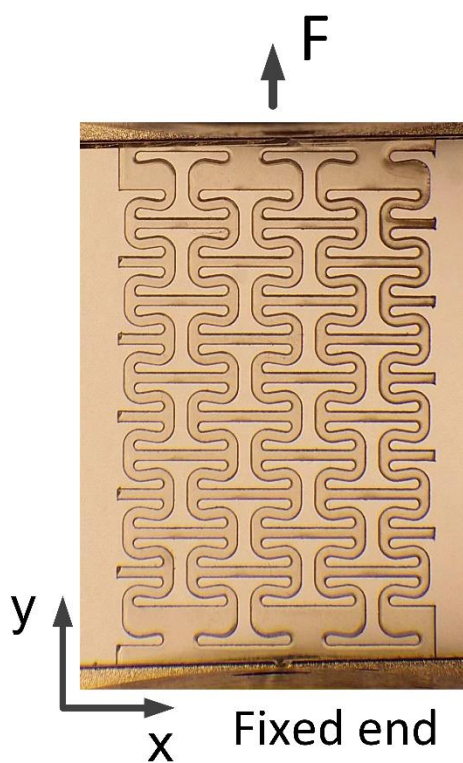


Рис.1. Дизайн двумерной ауксетической плоскости. Ось y соответствует оси растяжения, а ось x – поперечному направлению

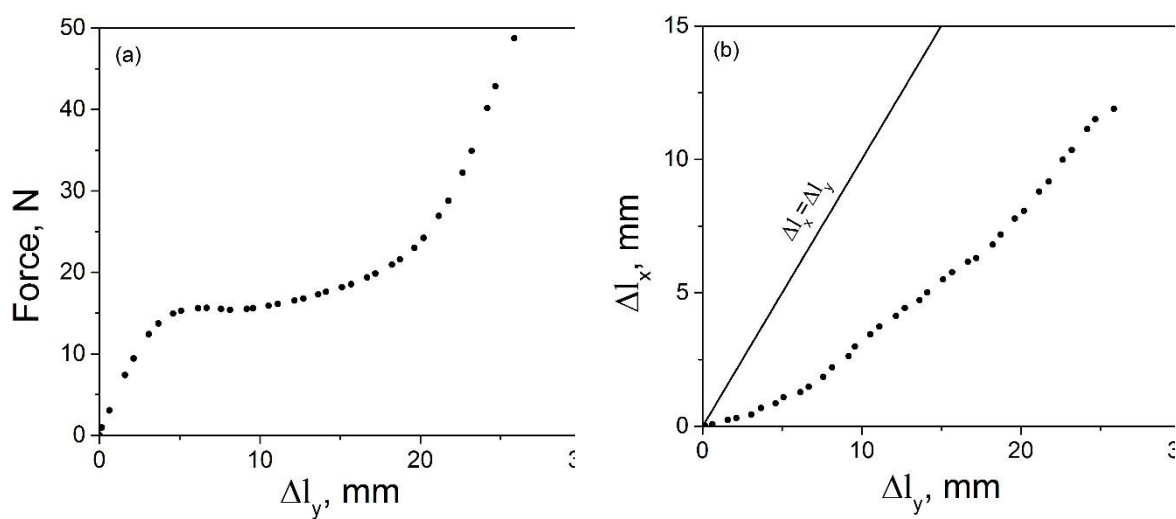


Рис.2. Диаграмма растягивающая сила – смещение ($F - \Delta l_y$) (a) и изменение поперечного смещения Δl_x в зависимости от продольного смещения Δl_y (b)

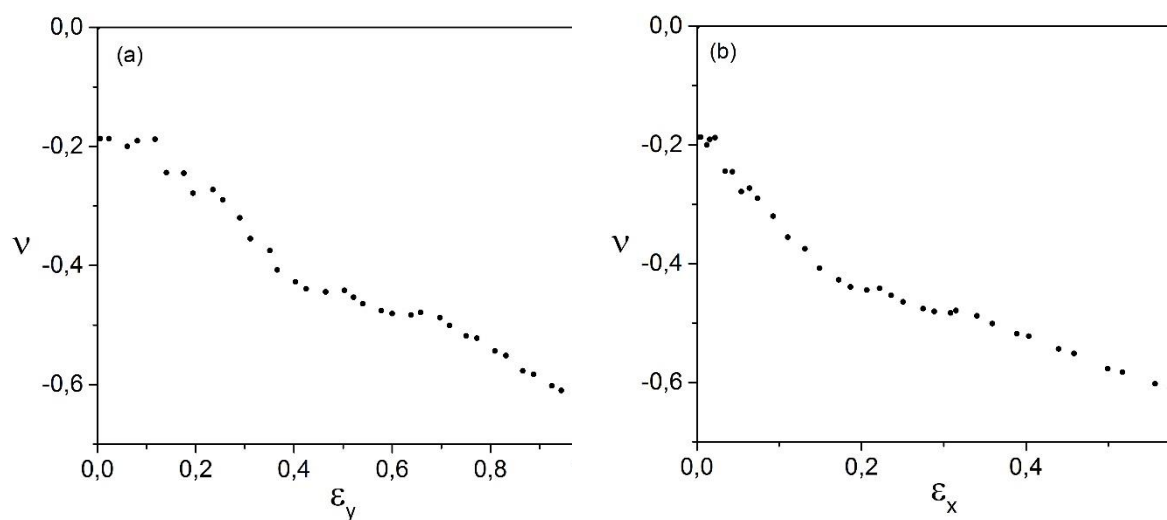


Рис.3. Коэффициент Пуассона как функция от (а) продольных деформаций ε_y и (б) поперечных деформаций ε_x

Рассмотренная ауксетическая конструкция может в дальнейшем использоваться в композиционных материалах для получения новых материалов с заданными механическими свойствами.

Работа выполнена в рамках Государственного задания АААА-А17-117021310373-3.

Литература

1. R.F. Almgren. J. Elasticity 15 (4), 427 (1985). DOI: 10.1007/BF00042531
2. A.G. Kolpakov, Prikl. Mat. Mekh. 59, 969 (1985).
3. D.Y. Fozdar, P. Soman, J.W. Lee, L.-H. Han, S. Chen, Adv. Func. Mater. 21 (14), 2712 (2011). DOI: 10.1002/adfm.201002022
4. L.J. Gibson, M.F. Ashby, G.S. Schajer, C.I. Robertson. Proc. Royal Soc. London A 382, 25 (1982). DOI: 10.1098/rspa.1982.0087
5. T.-C. Lim, Auxetic Materials and Structures. Springer Singapore. (2015) 588 p. DOI: 10.1007/978-981-287-275-3
6. H.M.A. Kolken, A.A. Zadpoor, RSC Adv. 7(9), 5111 (2017). DOI: 10.1039/C6RA27333E
7. R.V. Goldstein, V.A. Gorodtsov, D.S. Lisovenko. Eur. Journal of Mechanics - A/Solids 63, 122 (2017). DOI: 10.1016/j.euromechsol.2017.01.001
8. R.H. Baughman, J.M. Shacklette, A.A. Zakhidov, S. Stafström, Nature 392(6674), 362 (1998). DOI: 10.1038/32842
9. R.V. Goldstein, V.A. Gorodtsov, D.S. Lisovenko. Mech. Solids, 45(4), 529 (2010). DOI: 10.3103/S0025654410040047
10. R.V. Goldstein, V.A. Gorodtsov, D.S. Lisovenko. Phys. Status Solidi B, 250(10), 2038 (2013). DOI: 10.1002/pssb.201384233

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В СЛОИСТОЙ СРЕДЕ С ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИМ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ

Ледовских Д.С.^{1,2}

Научный руководитель – профессор, д.ф.-м.н. Никитин И.С.

¹ МАИ, Институт №11, Кафедра физики конструкционных материалов

² ИАП РАН, Отдел Математического моделирования

E-mail: d_ledovskih@list.ru

В данной работе на основе обобщенной модели с нелинейными условиями скольжения [1] численно решается нестационарная задача о прохождении упругой поперечной волны через слоистый пакет с тонкими вязкопластическими прослойками. Методом асимптотического осреднения [2,3] построена уточненная модель слоистой среды с нелинейными вязкопластическими условиями проскальзывания на межслойных границах. В уравнениях модели учтены члены вплоть до 2-го порядка по малому параметру толщины слоя $\varepsilon \ll 1$.

Сформулируем одномерную нестационарную систему уравнений для описания поперечных нестационарных возмущений, параллельных направлению слоев.

$$\begin{aligned} \rho u_{,t} &= \sigma_{,x} + \tau_{,z} + \varepsilon^2 \mu \Omega_{,z}, \quad \rho v_{,t} = \tau_{,x} + s_{,z} + \varepsilon^2 \mu \Omega_{,x} \\ \sigma_{,t} &= (\lambda + 2\mu) u_{,x} + \lambda v_{,z}, \quad s_{,t} = \lambda u_{,x} + (\lambda + 2\mu) v_{,z} \\ \tau_{,t} &= \mu v_{,x} + \mu u_{,z} + \mu \varphi_{,t}, \quad \varphi_{,t} = -(\tau / t_0) < F(\Delta) > / \mu \\ \Omega_{,t} &= -(g + \Omega)(\tau^2 / \tau_s^2)(< F(\Delta) > + 2 < F'_\Delta(\Delta) >) / t_0 \\ g &= (\rho \varphi_{,tt} / \mu - 4(\lambda + \mu) \varphi_{,xx} / (\lambda + 2\mu)) / 12, \quad \Delta = \tau^2 / \tau_s^2 - 1, \quad t_0 = 1 / (\kappa \mu) \end{aligned}$$

Здесь также введен параметр $t_0 = 1 / (\kappa \mu)$, который представляет собой характерное время релаксации касательных напряжений на предел текучести τ_s

Для функции $F(\Delta)$ часто принимают степенную аппроксимацию:

$$F(\Delta) = \Delta^{1+q}, \quad q > 0$$

С учетом этой аппроксимации нелинейные уравнения для τ , φ и Ω примут вид:

$$\begin{aligned} \tau_{,t} &= \mu u_{,z} - (\tau / t_0) < \Delta^{1+q} >, \quad \varphi_{,t} = -(\tau / t_0) < \Delta^{1+q} > / \mu \\ \Omega_{,t} &= -(g + \Omega) \left((3 + 2q) \tau^2 / \tau_s^2 - 1 \right) < \Delta^q > / t_0 \end{aligned}$$

Предложена численная разностная схема для решения полученной нелинейной системы уравнений, основанная на явной аппроксимации уравнений движения и неявной аппроксимации остальных уравнений, содержащих малый параметр в знаменателях свободных нелинейных членов.

Вначале аппроксимируем по известной явной схеме Лакса уравнение движения для скорости u , опустив в нем член $\varepsilon^2 \mu \Omega_{,z}$ (метод расщепления). Используя найденные значения u^{n+1} на верхнем временном слое, аппроксимируем по неявной разностной схеме уравнения для τ , φ и Ω , содержащие малый параметр t_0 в знаменателе нелинейных свободных членов [4]. Здесь и далее используем обозначение верхним индексом $n+1$ и n для величин на верхнем и нижнем слое по времени при разностной временной аппроксимации с шагом Δt . Полученные нелинейные разностные уравнения можно решить аналитически методом возмущений с учетом наличия малого параметра в системе уравнений и найти значения функций τ^{n+1} , φ^{n+1} , Ω^{n+1} на верхнем временном слое.

$$\tau^{n+1} = \tau_s \left(1 + \gamma^{1/(1+q)} \left(\left| \tau_e^{n+1} / \tau_s \right| - 1 \right)^{1/(1+q)} / 2 \right) \text{sign } \tau_e^{n+1} \quad \text{при } \left| \tau_e^{n+1} / \tau_s \right| - 1 \geq 0$$

$$\begin{aligned}\tau_e^{n+1} &= \tau_e^{n+1} \quad \text{при} \quad \left| \tau_e^{n+1} / \tau_s \right| - 1 < 0 \\ \varphi^{n+1} &= \varphi^n - (\tau_e^{n+1} / \mu) < (\tau_e^{n+1} / \tau_s)^2 - 1 >^{1+q} / \gamma \\ \Omega^{n+1} &= \Omega^n - (g^{n+1} + \Omega^{n+1}) \left((3+2q)(1 + \gamma^{1/(1+q)} (\left| \tau_e^{n+1} / \tau_s \right| - 1)^{1/(1+q)}) < \left| \tau_e^{n+1} / \tau_s \right| - 1 >^{q/(1+q)} / \gamma^{1/(1+q)} \right) \\ G^n &= < \left| \tau_e^n / \tau_s \right| - 1 > \left(1 + \gamma^{1/(1+q)} (\left| \tau_e^n / \tau_s \right| - 1)^{1/(1+q)} / 2 \right) \text{sign } \tau_e^n \\ \text{где } g^{n+1} &= -c_g (\tau_s / \mu) (G^{n+1} - G^n) / \Delta t^2\end{aligned}$$

Малый параметр γ равен $\gamma = t_0 / \Delta t \sim 1$, а $\tau_e^{n+1} = \tau^n + \mu u_{,z}^{n+1} \Delta t$ - значение касательного напряжения на верхнем слое после «упругого» шага по времени.

Пример численного решения задачи прохождения поперечной волны (пунктир) через слоистый пакет $0.5 < x_3 < 0.7$ с вязкопластическими прослойками, расположенный в упругом массиве $0 < x_3 < 1.0$, показан на Рис. 1. Характеристики материала: плотность $\rho = 1.0$, модули Ламе $\lambda = \mu = 0.333$, предел текучести $\tau_s = 0.00001$, параметр релаксации $\gamma = 0.1$, толщина слоя $\varepsilon = 0.10$, амплитуда приложенного импульса скорости $U_0 = 0.000035$, длительность импульса $T_0 = 0.20$. Приведены безразмерные значения параметров, при этом напряжения отнесены к $\lambda + 2\mu$, линейные величины к размеру расчетной области $H_{\max}$, скорости точек среды к величине скорости упругой продольной волны $a = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho}$. Параметры размерности времени отнесены к величине $H_{\max} / a$.

Падающая упругая поперечная волна, показанная на Рис. 1 пунктиром, в отсутствие слоистого пакета распространялась бы с неизменной формой и амплитудой. Наличие слоистого пакета приводит к сильной трансформации исходного профиля падающей упругой волны и появлению отраженной волны.

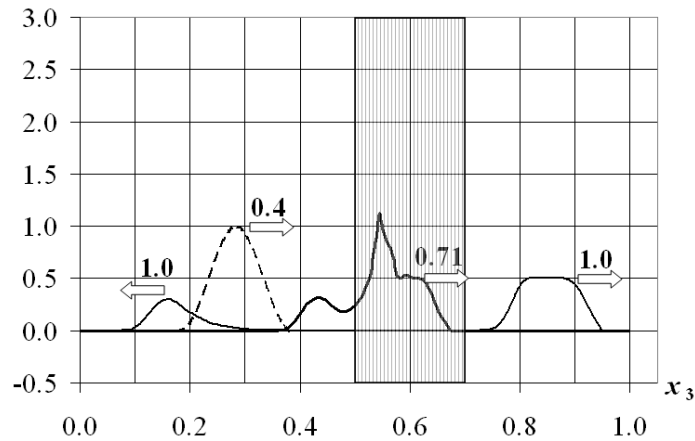


Рис. 1. Формы падающей, прошедшей через слоистый пакет и отраженной волн при $\varepsilon = 0.1$. Распределение скорости U / U_0 .

Подобные модели могут быть полезными при решении динамических задач сейсморазведки и интерпретации волновых картин, полученных в процессе ее проведения.

Литература

1. Nikitin I.S., Burago N.G., Nikitin A.D. Continuum Model of the Layered Medium with Slippage and Nonlinear Conditions at the Interlayer Boundaries// Solid State Phenomena. 2017. Vol. 258. Pp. 137-140.

2. Бураго Н.Г., Никитин И.С. Уточненная модель слоистой среды с проскальзыванием на контактных границах // Прикладная математика и механика. 2016. Т.80. № 2. С. 230-241.
3. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. М.: Наука. 1984. 352 с.
4. Никитин И.С. Динамические модели слоистых и блочных сред с проскальзыванием, трением и отслоением. //Изв. РАН. МТТ. 2008. № 4. С.154-165.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАРОЖДЕНИЯ И ДВИЖЕНИЯ ТРЕЩИН В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ПОРИСТОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА С РАЗЛИЧНЫМ ХАРАКТЕРОМ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОР

Ледяев М.Е., Полянская Л.В., Писарев А.В.

Научный руководитель – доцент, к.т.н. Воронин С. В.

Самарский университет

E-mail: sillmarllion@mail.ru

Рассмотрены конечно-элементные модели пористого материала с квадратным и шахматным расположением пор. Выявлены очаги зарождения трещин в пористом материале и характер их распространения в зависимости от количества пор и способа их расположения.

Введение. Упорядоченная пористая структура материала позволяет повысить удельные механические характеристики. Данный эффект достигается благодаря тому, что поры, в данном случае, выполняют функцию упрочняющей фазы с нулевой плотностью. Процесс эксплуатации изделий, как правило, сопровождается двумя стадиями: деформация материала и его разрушение. Стоит отметить, что эксплуатация материала, в ряде случаев, продолжается даже на стадии образования и распространения трещины. Исключением являются те случаи, когда распространение трещины носит катастрофический характер. Однако, процесс зарождения и распространения трещины в пористом материале может отличаться от характера разрушения компактного материала. Т.к. поры могут выполнять двойную роль: одновременно являясь концентраторами напряжений и стопорами для распространения трещины. Поэтому целью данной работы является определение мест локализации зарождения трещин в зависимости от типа пористой структуры.

Методы. В качестве объекта исследования были выбраны конечно-элементные модели с квадратным и шахматным расположением пор. Для определения влияния количества пор на характер образования мест зарождения трещин были построены конечно-элементные модели с четырьмя и девятью порами. Конечно-элементный анализ проводился в программном продукте MSC.Nastran. Конечно-элементным моделям задавались механические свойства алюминиевого сплава АД1 в нагартованном состоянии. Таким образом было сделано допущение, что материал абсолютно упругий, тем самым исключив пластическую деформацию. Данные модели подвергались одноосному растяжению. Процесс моделирования зарождения и движения трещин осуществлялся с помощью разработанного авторской программы-приложения (макрос). В алгоритм макроса заложены два основных принципа. Первый – трещина образуется в том месте, где максимальные напряжения превосходят предел прочности материала. Второй – трещина двигается в том направлении, где затрачивается минимум работы для ее продвижения [1].

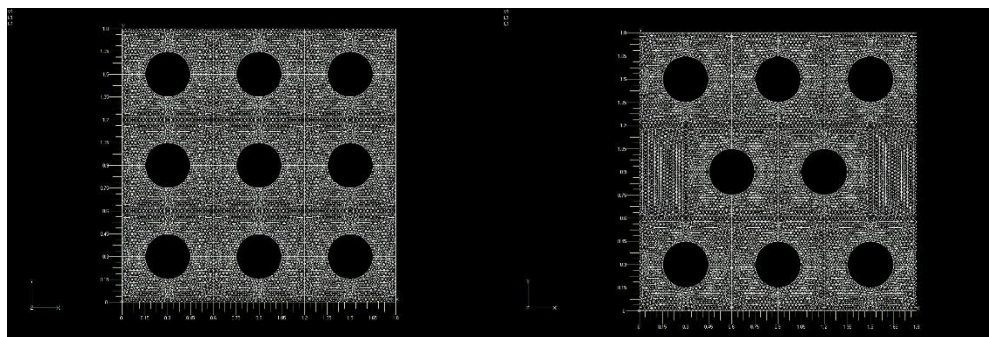


Рис. 1. Конечно-элементные модели пористого материала с квадратным (слева) и шахматным (справа) характерами расположения пор

В результате анализа четырех конечно-элементных моделей установлено, что при квадратном расположении пор, в моделях с четырьмя и девятью порами, очагами зарождения трещин являются поры, расположенные ближе к краю образца. Характер направления трещины стремится к краю образца. В случае шахматного расположения пор в

модели четырех пористого образца направление больших трещин направлено в глубь материала, в отличие от случая с квадратным расположением пор. Следует отметить, что в конечно-элементной модели присутствуют трещины меньшей длины, направленные к краю образца. В случае модели с девятью порами, очагами зарождения трещин являются поры, расположенные в среднем ряду. Трещины направлены от них симметрично к рядам пор, расположенным ближе к краю образца. Так же наблюдается зарождение малых трещин на центральных порах крайних рядов, направленных в глубь материала.

Литература

1. Voronin, S.V., Computer-Aided Study of Materials' Microstructure Influence on Cracks' Propagation Pattern in Brittle Anisotropic Bodies [Текст] / S.V. Voronin, V.D. Yushin, G.Z. Bunova // Modern Applied Science – Vol. 9, No. 3. – 2015. – P. 51-58.

УЧЕТ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ОБРАЗЦА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Лобода П.С.¹, Ледяев М.Е.², Воронин С.В.²

Научный руководитель – профессор, д.ф.-м.н. Амосов А.П.¹

¹ СамГТУ

² Самарский университет

Поверхностное натяжение твердого тела проявляет себя как сила, приложенная к контуру поверхности и стремящаяся деформировать твердое тело [1]. Поэтому поверхностное натяжение по нашему мнению должно оказывать влияние на механические свойства материала. Большая часть исследований на данную тему посвящена экспериментальным методам определения поверхностного натяжения [2]. Определение зависимости механических свойств от величины поверхностного натяжения в условиях натурального эксперимента является достаточно трудоемким.

Поэтому целью данного исследования было определить степень влияния поверхностного натяжения в металле на механические свойства методом конечно-элементного моделирования.

Исследование проводилось в программной среде MSC.Marc, основанной на методе конечных элементов. Сравнивались конечно-элементные модели образцов с учетом и без учета поверхностной энергии. Длина модели составляла 0,73 мм, ширина - 0,15 мм, толщина варьировалась от 73,5 нм до 735 нм. Моделям задавались свойства алюминиевого сплава АД1. Поверхностная энергия алюминия составляет $E_p = 1,140 \text{ Дж/м}^2$ [2]. Справочное значение поверхностной энергии пересчитывалось в единицы силы, распределенной по длинам ребер образцов. К контурам конечно-элементных моделей плоского образца прикладывалась нагрузка, имитирующая силу поверхностного натяжения на всех гранях образца.

Полученный ряд конечно-элементных моделей образцов с разной толщиной, при неизменных длине и ширине, подвергался одноосному растяжению с усилиями, вызывающими напряжение 50 МПа, что превышает предел текучести для данного сплава, но не превышает его предел прочности. Затем, по разработанной ранее методике, строились виртуальные диаграммы растяжения, по которым происходило сравнение пределов текучести конечно-элементных моделей образцов с учетом и без учета сил поверхностного натяжения.

При анализе полученных данных было определено влияние поверхностного натяжения на механические свойства моделей образцов. Однако данный эффект оказывает существенный вклад в механические свойства только на тонких конечно-элементных моделях. При толщине 735 нм приращение предела текучести составило 4,06% по сравнению с моделями образца без учета поверхностного натяжения. При уменьшении толщины приращение предела текучести продолжало увеличиваться и на толщине 73,5 нм составило 36,66%.

Литература

1. Гохштейн А.Я. Поверхностное натяжение твердых тел и адсорбция. М.: Наука, 1976. 400 с.
2. Олешко В.С., Пиговкин И.С. Оперативное определение поверхностной энергии металлических деталей авиационной техники // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2016. Том 8, №3. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/131EVN316.pdf> (дата обращения 15.02.2018)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ВЕКТОРНЫХ СВОЙСТВ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ ПО ЛОМАННЫМ ТРАЕКТОРИЯМ

Лоевец Д.А.

Научный руководитель – доцент, к.ф.-м.н. Волегов П.С.

ПНИПУ

E-mail: loevetsda@gmail.com

В работе рассматриваются задачи, связанные с описанием эффектов, возникающих при деформировании представительного объема поликристалла по траекториям в виде ломанных, а также по циклическим траекториям. Проведены численные эксперименты по неупругому деформированию представительного объема поликристалла по ломанным траекториям в форме квадрата с использованием двухуровневой модели неупругого деформирования поликристаллов на базе физической теории пластичности, анализ результатов проведен с использованием теории упругопластических процессов А.А. Ильюшина, в том числе проведено сопоставление с результатами экспериментальных исследований. Получены качественные и количественные оценки возникающих эффектов.

Для удовлетворения постоянно изменяющихся потребностей экономики и промышленности необходимо разрабатывать новые материалы и конструкции. Возможно несколько вариантов создания материала с наперед заданными свойствами: это разработка технологий создания новых металлических материалов и сплавов (в том числе – с учетом химического состава, особенностей внутренней структуры и т.д.) или модификация схем обработки имеющихся материалов таким образом, чтобы после всех этапов обработки получать образцы с необходимыми эксплуатационными характеристиками. Любой материал перед массовым изготовлением и производством конструкций или изделий из него подвергается серии испытаний, позволяющих определить допустимые условия эксплуатации и подобрать физические и механические характеристики материалов таким образом, чтобы соответствующий материал или конструкция прослужили максимально долго и безопасно.

Целью исследования являлись построение и реализация математической модели, позволяющей описывать напряженно-деформированное состояние (НДС) представительного объема поликристалла на макроуровне, в частности – описывать эффекты, сопровождающие сложное, в том числе циклическое (знакопеременное), нагружение представительного объема поликристалла при неупругом деформировании.

Для реализации модели неупругого деформирования представительного объема поликристалла будет использоваться двухуровневая математическая модель, основные соотношения модели представлены в работах [1–2]. Использование многоуровневого подхода, основанного на физических теориях пластичности, позволяет определять свойства материала не только на конечном этапе обработки, но и наблюдать за эволюцией свойств на всех этапах производства материала или конструкции. Для анализа результатов моделирования процессов сложного деформирования были использованы понятия, сформулированные в рамках теории упругопластических процессов (ТУПП) А.А. Ильюшина [3], которые позволяют перейти от использования тензорных параметров напряженно-деформированного состояния к геометрически более прозрачному векторному представлению соответствующих величин.

В ходе исследования реализована модель упругопластического деформирования поликристалла, позволяющая описывать эффекты, связанные с циклическим и сложным нагружением представительного объема материала. Для описания эффекта запаздывания векторных свойств был проведен численный эксперимент, который заключался в деформировании представительного объема поликристалла по траектории в виде квадрата. Характеристики модельного материала соответствуют характеристикам стали 40. Графическое представление траектории деформирования показано на рис. 1.

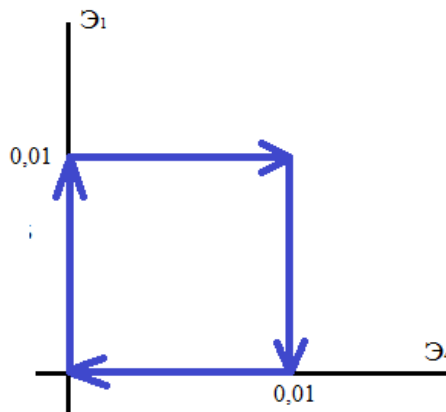


Рис. 1. Траектория нагружения представительного объема поликристалла в пространстве $\mathcal{E}^5$

Для проверки адекватности модели был проведен ряд численных экспериментов, имитирующих условия натурального эксперимента, результаты которого приведены в работе [4] (рис. 2).

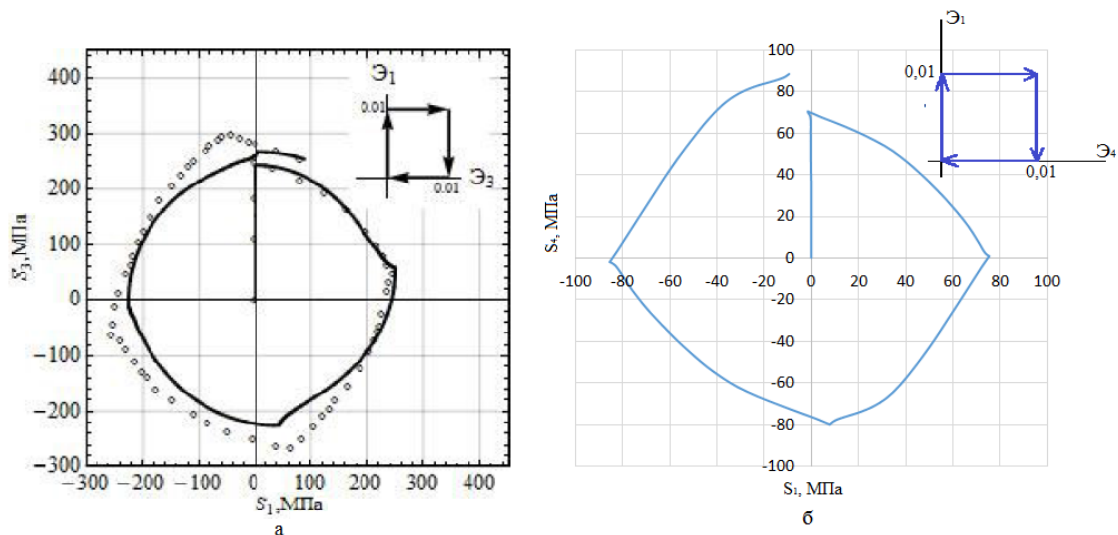


Рис. 2. Траектория нагружения представительного объема поликристалла в пространстве напряжений: а) при нагружении по траектории деформирования в виде квадрата: сплошная линия – расчёт, точки – эксперимент [4]; б) расчёт с использованием двухуровневой модели неупругого деформирования

На рис. 2 наблюдается достаточно высокая степень качественного совпадения результатов численного моделирования и натурального эксперимента (причем это совпадение даже лучше, чем в теоретической модели, предложенной в [4]), что подтверждает адекватность применяемой модели. Из анализа рис. 2 можно сделать вывод о возможности использования двухуровневой модели неупругого деформирования поликристаллов для описания эффекта запаздывания векторных свойств материала.

Также в процессе моделирования были получены и количественные оценки степени проявления эффекта запаздывания векторных свойств при деформировании по траектории в виде квадрата. Проведено сравнение результатов численного эксперимента с использованием двухуровневой модели неупругого деформирования с данными, полученными из натурального эксперимента. Получены зависимости напряженно-деформированного состояния при деформировании по циклическим (знакопеременным) траекториям, а также по траекториям, имеющим постоянную кривизну. Также в рамках исследования были реализованы численные эксперименты, позволяющие оценить степень проявления эффекта «нырка» напряжений при деформировании по траекториям с изломами.

В ходе этих экспериментов были получены количественные оценки степени проявления этого эффекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-1298.2017.1.

Литература

1. Трусов П.В., Волегов П.С., Кондратьев Н.С. Физические теории пластичности: учебное пособие. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 244 с.
2. Волегов П.С., Грибов Д.С., Швейкин А.И. Конститутивная модель упруговязкопластического деформирования ГЦК-монокристалла. К идентификации законов упрочнения // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. – 2012. – № 4 (22). – С. 19-23.
3. Зубчанинов В.Г., Алексеев А.А., Алексеева Е.Г. Математическое моделирование процессов пластического деформирования материалов посложным плоским траекториям // Materials Physics and Mechanics. – 2015. – № 24. – С. 107-118.
4. Темис Ю. М., Алхимов Д. А., Мартынова А. Д. Применение инвариантной теории пластического течения для моделирования процессов испытаний образцов при сложном упругопластическом деформировании // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2015. – Т. 14, № 3. – Ч. 1. – С. 24-36.

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА И УСТОЙЧИВОСТЬ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ НАНО- И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ В СВЯЗАННЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Лукин А. В., Попов И. А.

Научный руководитель – профессор, д.ф.-м.н. Скубов Д. Ю.

СПбПУ, Институт прикладной математики и механики, Кафедра механики и процессов управления

E-mail: lukinalexei@yandex.ru

В связи с интенсивным развитием микро- и наносистемной технологии большое внимание научного сообщества стало направляться на изучение новых физически нелинейных связанных задач (электро-, магнито-, термоупругости и др.), описывающих сложные процессы работы различных приборов и устройств на базе нано/микроэлектромеханических систем (НЭМС/МЭМС). Так, важнейшей характеристикой широкого класса объектов нано- и микросистемной техники (узкополосные высокочастотные фильтры, акселерометры, высокоточные актуаторы и др.) является добротность резонансных свойств. Стремление к увеличению рабочих частот приводит к миниатюризации данных устройств. Однако экспериментальные исследования показывают, что добротность резонаторов значительно уменьшается вместе с их размерами, в том числе и для монокристаллических материалов [1]. Изучение различных механизмов диссипации и степени их влияния на добротность нано- и микромасштабных систем представляет большой практический интерес. Другой практически важной и далеко не полностью изученной областью исследований является проблема динамической устойчивости элементов конструкций. В ряде современных работ [2,3] показано, что критические значения динамических усилий, при которых происходит потеря устойчивости, могут существенно отличаться от известных статических (Эйлеровых) значений. Указанное явление встречается при применении лазерных технологий для неразрушающего контроля конструкций и изучения физических свойств материалов на микро- и наномасштабном уровне, а также при осуществлении технологических процессов производства элементов нано- и микросистемной техники [4-6]. Необходимость решения подобного класса задач возникает также и при исследовании работоспособности нано- и микроэлектромеханических систем в условиях ударно-импульсных тепловых воздействий.

В первой части работы выполняется анализ влияния термоупругой диссипации на добротность нано- и микроэлектромеханических резонаторов. Рассмотрена задача о малых колебаниях в окрестности нетривиального положения равновесия круглой проводящей пластинки в поле одного неподвижного электрода с учетом процесса рассеяния механической энергии упругих колебаний путем её превращения в тепло. Аналитическое решение задачи определяется с помощью проекционных методов решения нелинейных краевых задач и задач на собственные значения. Согласно результатам расчетов, зависимость добротности от геометрических параметров пластинки не является монотонной, что с качественной стороны согласуется с оценкой, полученной Зинером [7]: максимальное затухание в системе наблюдается при совпадении частоты колебаний с эффективной скоростью релаксации. Сопоставление аналитических и численных результатов позволило верифицировать методику численного расчета задач подобного класса.

Во второй части работы исследуется динамика и устойчивость упругого элемента электростатического преобразователя, моделируемого в виде балки Бернулли-Эйлера, в условиях импульсного теплового (лазерного) воздействия. Принято, что действие лазерного импульса на поверхность балки сводится в основном к появлению теплового фронта, распространяющегося по её объему. Неравномерность и нестационарность поля температуры как по толщине, так и по длине балки в общем случае приводят к появлению изгибающего момента и осевого усилия, ответственных за возможную потерю устойчивости. В целях некоторого упрощения задачи лазерное воздействие считается равномерным по длине балки. С помощью аналитических методов решения нелинейных краевых задач эллиптического типа получено исходное положение равновесия балки под

действием электростатического поля. Найдено поле температуры в балке при действии лазерного импульса. Указано на возможность потери устойчивости положения равновесия при нагреве упругого элемента лазерным импульсом. Определены области в пространстве параметров импульса, соответствующие устойчивости и неустойчивости указанного положения равновесия.

Литература

1. Lifshitz R., Roukes M. L. Thermoelastic damping in micro- and nanomechanical systems. *Condensed Matter Physics*. 1999. 114-36
2. Беляев А.К., Морозов Н.Ф., Товстик П.Е., Товстик Т.П. Параметрические резонансы в задаче о продольном ударе по тонкому стержню. *Вестник С.Петербург. ун-та*. 2016. Сер.1.
3. Лаврентьев М.А., Ишлинский А.Ю. Динамические формы потери устойчивости упругих систем. *Докл. АН СССР*. 1949. Т. 64. № 6. С. 776–782
4. Sun Y., Ma J. et.al. Analytical solution of transient heat conduction in bi-layered circular plate irradiated by laser pulse. *Canadian Journal of Physics*. 2016.
5. Poletkin K., Kulish V. et. al. Thermal properties of thin films studied by ultrafast laser spectroscopy: Theory and experiment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. April, 2014.
6. Xinwei Wang, Xiafan Xu Thermoelastic waves in metal induced by ultrafast laser pulses. *Journal of Thermal Stresses*. № 25. 2002. P. 457-473.
7. Zener C. Internal Friction in Solids I: Theory of Internal Friction in Reeds. *Physical Review*. V. 52. 1937. P. 90–99.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛОСКИХ И ТРУБЧАТЫХ ЯЧЕИСТЫХ КОНСТРУКЦИЙ С АУКСЕТИЧЕСКИМ ПОВЕДЕНИЕМ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Максимова К. А. М.¹, Ченцов А. В.²

¹МАИ, ² ИПМех РАН,

E-mail: iiunix@yandex.ru

Экспериментально исследованы механические свойства плоских ячеистых конструкций с ауксетическим поведением при одноосном растяжении с искусственно созданными дефектами. Анализ экспериментальных данных показал, что отсутствие горизонтального элемента в ячеистой конструкции с криволинейными элементами слабо влияет на механические свойства при одноосном растяжении в отличие от конструкции с отсутствующим вертикальным криволинейным элементом.

Введение. В настоящее время внимание материаловедов привлекают методы повышения эксплуатационных характеристик традиционных материалов путем реализации структур, обладающих существенно нелинейными и аномальными деформационными свойствами, вплоть до получения адаптивной (приспособительной) механической реакции материалов на внешнее воздействие.

Ауксетик – это материал, который расширяется при растяжении, т. е. становится толще в направлении, перпендикулярном приложенной силе. Такое поведение возможно из - за шарнирно – подобной структуры, которая деформируется при растяжении. Это происходит благодаря свойствам отдельных молекул или определяется структурными особенностями материала на макроскопическом уровне.

Коэффициент Пуассона ν (величина отношения поперечной к продольной относительной деформации образца материала) у ауксетиков принимает отрицательные значения. Он зависит не от размеров тела, а от природы материала, из которого изготовлен образец.

От материалов этого типа ожидаются хорошие механические свойства, такие как значительное поглощение механической энергии и высокое сопротивление разрушению.

Теоретические и экспериментальные исследования показали возможность использования ауксетических конструкций в качестве протезов для кровеносных сосудов, протоков, включая трахею. Кроме того, ауксетические пороматериалы могут найти еще одно применение в медицине: в качестве подушек и прокладок для лежащих больных. Ожидается также применение пористых ауксетиков в качестве фильтров и сит.

Методы. В работе [1] экспериментально изучено одноосное растяжение двумерных ауксетических ячеистых конструкций. В качестве основы структуры выбраны вогнутые шестиугольники, в которых часть прямых элементов заменена на криволинейные элементы.

Методом резки фемтосекундным лазером были изготовлены различные образцы из неауксетического полиэтилентерефталата (ПЭТ-а аморфный), размерами 112.5×24×0.7 мм с центральной зоной 28×24×0.7 мм.

Дизайн образцов выбран таким, чтобы поперечный размер элементов конструкции выбирался равным толщине исходной пластины. Фотографии образцов до деформирования приведены на рис. 1. Образцы имели следующие особенности: образец ss – вогнутые шестиугольники с криволинейными элементами (рис. 1, а), образец ssH – вогнутые шестиугольники с криволинейными элементами и одним отсутствующим горизонтальным элементом (рис. 1, б), образец ssV – вогнутые шестиугольники с криволинейными элементами и одним отсутствующим вертикальным элементом (рис. 1, в). Образцы были подвергнуты монотонному одноосному растяжению на установке MTS Synergie 400 со скоростью 1 мм/мин с одновременной регистрацией перемещений и усилий, до момента, когда они еще оставались плоскими [2].

В работе также применена безмоментная теория тонкостенных оболочек вращения [3]. Данная теория позволяет соотнести плоские и трубчатые образцы (рис. 2). Такой подход позволяет получить эффективные свойства для трубок по уже имеющимся данным для плоскостей, не прибегая непосредственно к эксперименту.

Под оболочкой понимается тело, одно из измерений которого (толщина) значительно меньше двух других. Для классификации оболочек удобно использовать понятие срединной

поверхности. Геометрическое место точек, равноотстоящих от обеих поверхностей оболочки, носит название срединной поверхности. Если срединная поверхность оболочки является плоскостью, то такую оболочку называют пластиной. Если срединная поверхность оболочки образует поверхность вращения в форме цилиндра, то оболочку называют цилиндрической.

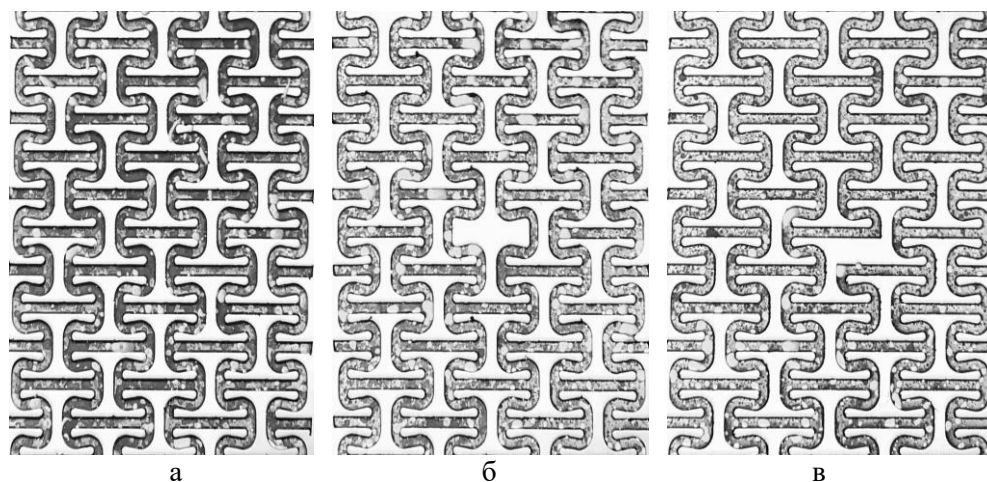


Рис. 1. Плоские образцы

Задача о расчете тонкостенных оболочек вращения наиболее просто решается в том случае, когда возможно принять, что напряжения, возникающие в оболочке, постоянны по толщине и, следовательно, изгиб оболочки отсутствует. При осесимметричной нагрузке отсутствуют также сдвигающие силы.

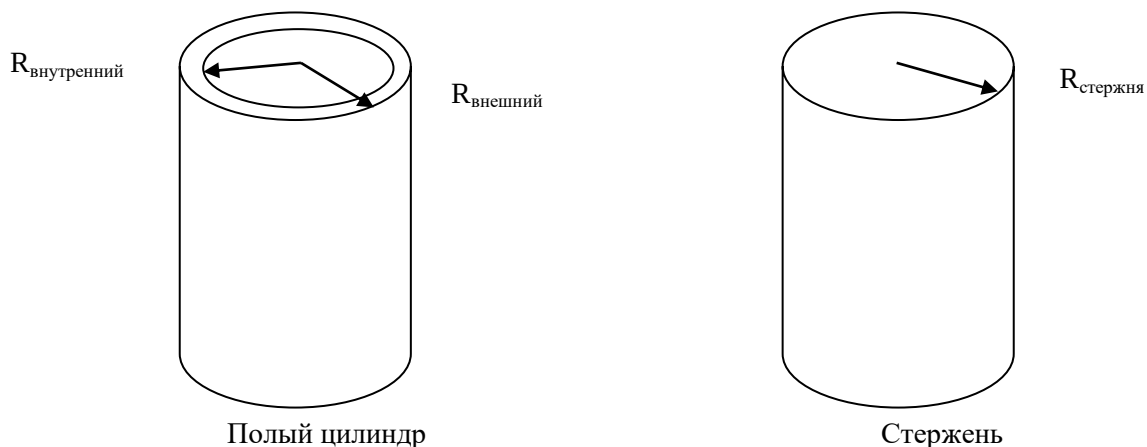


Рис. 2. Трубчатые образцы

Будем считать, что полый трубчатый образец получен путем сворачивания прямоугольной пластины, пренебрегая краевыми эффектами. Тогда для полых трубчатых образцов удастся рассчитать зависимость функции жесткости от продольной деформации (рис. 3, обозначения сохранены). Для образца ss зависимость функции жесткости для образца представлена линией E ss; E ssH – образец с отсутствующим горизонтальным элементом; E ssV – образец с отсутствующим вертикальным элементом.

По результатам эксперимента изучено влияние дефектов на значение коэффициента Пуассона для плоских ячеистых конструкций. Также проведено сравнение локальных и эффективных результатов [2]. В настоящей работе проверено представление о том, что значения продольных и поперечных деформаций для трубчатых ячеистых образцов совпадают со значениями деформаций для плоских образцов. Такое же поведение принимается и в случае, когда образец сплошной.

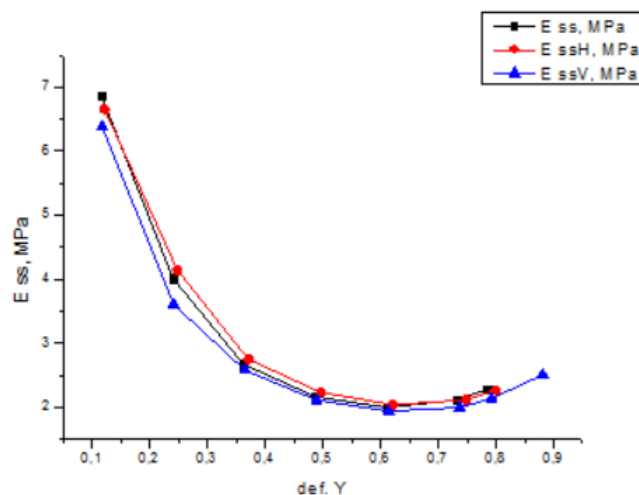


Рис. 3. График зависимости жесткости от продольной деформации

На рис. 4 отражена зависимость коэффициента Пуассона полых трубчатых образцов от времени проведения эксперимента. Данные деформаций, полученные для плоскостей позволили посчитать и отобразить эту зависимость графически. Также приведена зависимость коэффициента Пуассона от продольной деформации (рис. 5).

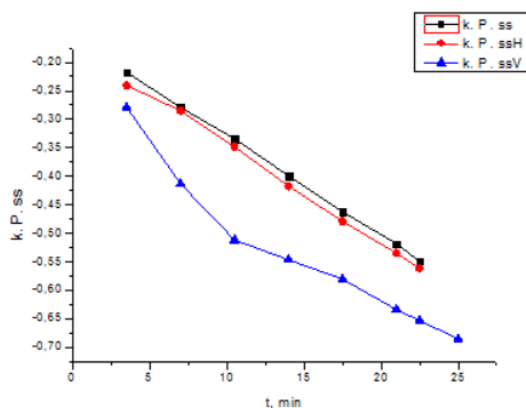


Рис. 4. График зависимости коэффициента Пуассона от времени

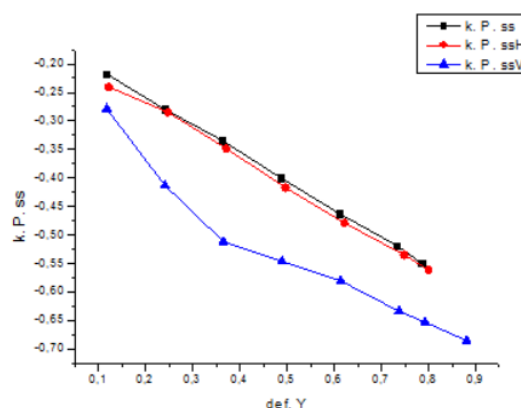


Рис. 5. График зависимости коэффициента Пуассона от продольной деформации

Получены формулы для расчета напряжений в полном цилиндре и в стержне, позволяющие построить функции жесткости для трубчатых образцов, с учетом площадей поперечного сечения рассматриваемого образца, а именно: $\sigma_{\text{стерж.}} = 4F/L^2$ и $\sigma_{\text{пол.цил.}} = F/(L^2 - \pi L^2 + 4\pi Lt - 4\pi^2 t^2)$, где F – сила, приложенная к образцу; L – длина окружности; t – толщина пластинки.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 17-01-00526.

Литература

1. Гольдштейн Р.В., Лисовенко Д.С., Ченцов А.В., Лаврентьев С.Ю. Экспериментальное изучение ауксетического поведения вогнутой ячеистой решетки с криволинейными элементами. Письма о материалах. 2017 г. Т.7, В.2, С.81-84.
2. Ченцов А.В., Максимова К.А.М. XXIX Международная конференция «Машиноведение и инновации. Конференция молодых учёных и студентов» (МИКМУС - 2017). Изд – во ИМАШ РАН, 2018 – 479 с. С. 36 – 39.
3. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. Статика. 1977 г. 488 с.

ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ЛИСТОВЫХ ИЗДЕЛИЙ В РЕЖИМЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Матасов И. И.

Научный руководитель – доцент, д.т.н. Ларин С. Н.

ТулГУ, Политехнический институт, Кафедра механики пластического формоизменения

E-mail: pasynkovandre@gmail.com

Конструкции, включающие в себя один или несколько листовых слоев ячеистой формы применяются для корпусов топливных емкостей, а также для внешних корпусов деталей, крыльев, обтекателей и т.д. Одновременно при повышенной прочности эти конструкции характеризуются небольшим весом и равнопрочностью при нагружении. Существующие технологии получения конструкций ячеистой формы составляют в основном процессы фрезерования и электрохимической обработки. Перспективными в плане изготовления этих конструкций выглядят технологии горячего медленного деформирования избыточным давлением газа. Были получены выражения, позволяющие получить подход к моделированию изотермического свободного деформирования в матрицах квадратной формы, в условиях кратковременной ползучести. Для чего рассмотрим формоизменение листа толщиной в матрице квадратной формы с реализацией режима кратковременной ползучести под давлением. Материал проявляет анизотропные свойства. Предполагается, что заготовка вырезается из листа так, что сторона ее совпадает с направлением оси (перпендикулярно направлению прокатки). Заготовка закреплена по внешнему контуру.

При моделировании предполагаем, что напряженное состояние заготовки плоское. Изделие при формоизменении приобретает профиль в виде сферы. При деформировании считаем, что вдоль осей симметрии профиль представляет собой окружность.

Получены зависимости для определения давления и критических режимов, с помощью которых был выполнен теоретический анализ изотермического формоизменения. Вычисления производились для сплава АМг6. По результатам были получены зависимости влияния закона нагружения, геометрии изделия, механических свойств заготовки на напряжения, деформации, давление операции и критические режимы процесса.

Выполнив анализ показанных зависимостей, было установлено, что с увеличением процесса формоизменения до какого-то предела происходит заметный рост относительной высоты заготовки и уменьшение значения относительной толщины заготовки в верхней части изделия и в точках ее фиксации. Выявлено, что изменение относительной толщины в куполе заготовки осуществляется более интенсивно по сравнению с изменением относительной толщины в месте ее закрепления. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных данных дает удовлетворительный результат.

Полученные в ходе моделирования выражения, позволяют получить подход к моделированию изотермического свободного деформирования в матрицах квадратной формы, в условиях кратковременной ползучести, на основании которых выполнена теоретическая оценка изотермического формоизменения листовой заготовки в режиме вязкого течения. Установлены зависимости влияния закона нагружения, геометрии изделия, механических свойств заготовки на напряжения, деформации, давление операции и критические режимы процесса изотермической пневмоформовки в режиме кратковременной ползучести.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 16-48-710016 и гранта администрации Тульской области.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНОГО РЕЖИМА НАГРУЖЕНИЯ НА ПРОЦЕССЫ ИНТЕНСИВНЫХ НЕУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Микрюков А.О.

Научный руководитель – доцент, к.ф.-м.н. Волегов П.С.

ПНИПУ

E-mail: anto-mikryuko@yandex.ru

В работе рассматриваются вопросы, связанные с влиянием температуры и скорости деформирования на физико-механические свойства материала. Построена математическая модель, которая позволяет описать механизмы неупругого деформирования, а также учесть влияние скорости деформирования и температуры на процесс деформирования.

Введение. В настоящее время в машиностроении для повышения эксплуатационных свойств материалов активно применяется термомеханическая обработка (ТМО). Материалы при ТМО испытывают колоссальные пластические деформации, которые вносят существенный вклад в изменение внутренней структуры, что, в свою очередь, приводит к изменению поведения материала при дальнейшем использовании. Характер пластических деформаций при конкретных режимах ТМО во многом обуславливается двумя параметрами воздействия: температурой и скоростью деформирования. Это объясняется тем, что температура определяет лидирующий механизм неупругого деформирования, а влияние скорости деформирования на процессы неупругой деформации металлов и сплавов необходимо рассматривать совместно с температурным влиянием в силу конкурирующих процессов упрочнения, разупрочнения и накопления поврежденности [1]. Основываясь на экспериментальных данных по определению предела текучести материала при конкретных температурах и скоростях деформирования (рис.1), выделяют три класса механизмов неупругого деформирования: низко-, средне- и высокотемпературные.

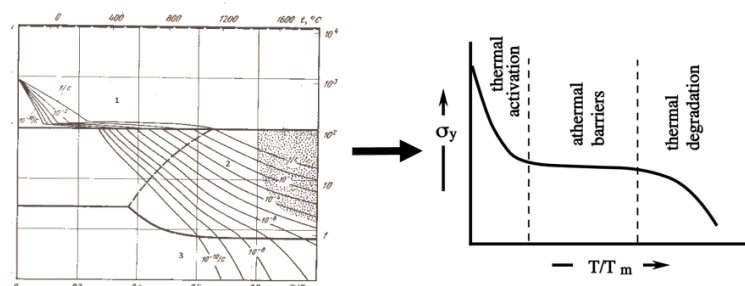


Рис. 1. Классификация механизмов неупругого деформирования на основе экспериментов по определению предела текучести в зависимости от температуры и скорости деформирования [2, 3]

Классификация обусловлена механизмами неупругой деформации, соответствующими конкретным диапазонам температур: для диапазона температур от 0 до $0,3T_{пл}$ (низкотемпературные пластические деформации) основными выступают термоактивируемые механизмы, такие как скольжение дислокаций и двойникование; для диапазона температур от $0,3T_{пл}$ до $0,5T_{пл}$ (низкотемпературные пластические деформации) характерны атермические механизмы, к которым относят внутризеренное скольжение; а для температур от $0,5T_{пл}$ (или высокотемпературных деформаций) – диффузионные механизмы, например, дислокационная и/или диффузионная ползучесть [4].

Целью работы является разработка и реализация математической модели, описывающей процессы неупругого деформирования поликристаллического материала с ОЦК решеткой при учете влияния температурно-скоростного режима нагружения.

Модель неупругого деформирования поликристалла. Учесть механизмы неупругого деформирования, которые вносят наибольший вклад на поведение материала, при моделировании процессов деформирования возможно с помощью использования

соответствующей модели кристаллита, которая описывает механизмы деформирования с точки зрения физики процесса. Таким образом, в работе для описания процессов неупругого деформирования используется двухуровневый подход к описанию неупругого деформирования поликристалла, основанный на физических теориях пластичности [5]. Согласно данному подходу представительный объем поликристалла соответствует макроуровню, который состоит из элементов мезоуровня – кристаллитов. Структура и соотношения модели на уровне представительного макрообъема подробно изложены, например, в [5].

Модель мезоуровня включает в себя описание таких механизмов, как механизм скольжения дислокаций по кристаллографическим системам, который выступает основным для низкотемпературных деформаций, дислокационную ползучесть, которая относится к среднетемпературным деформациям, и диффузионную ползучесть как механизм высокотемпературных деформаций. Для описания вышеперечисленных механизмов принимается гипотеза об аддитивном разложении неупругой составляющей тензора скорости деформации на низко- $\mathbf{d}_{ds}^{in}$, средне- $\mathbf{d}_{dc}^{in}$ и высокотемпературные $\mathbf{d}_{dif}^{in}$, которая представима как:

$$\mathbf{d}^{in} = \mathbf{d}_{ds}^{in} + \mathbf{d}_{dc}^{in} + \mathbf{d}_{dif}^{in}. \quad (1)$$

Модель мезоуровня имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\pi} : \mathbf{d}^e = \boldsymbol{\pi} : (\mathbf{d} - \mathbf{d}^{in}), \\ \mathbf{d}^{in} = \mathbf{d}_{ds}^{in} + \mathbf{d}_{dc}^{in} + \mathbf{d}_{dif}^{in}, \\ \mathbf{d}_{ds}^{in} = \sum_{k=1}^K \dot{\gamma}_{ds}^{(k)} \mathbf{b}^{(k)} \mathbf{n}^{(k)}, \\ \mathbf{d}_{dc}^{in} = \sum_{k=1}^K \dot{\gamma}_{dc}^{(k)} \mathbf{n}^{(k)} \mathbf{n}^{(k)}, \\ \mathbf{d}_{dif}^{in} = \alpha \frac{b^3 D_{sd}}{d^2 k_B T} \boldsymbol{\sigma}, \\ \dot{\gamma}_{ds}^{(k)} = \dot{\gamma}_0 \exp \left(- \frac{b^3}{2\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{G(\tau^{(k)} - \tau_c^{(k)})}}{k_B T} \right) H(\tau^{(k)} - \tau_c^{(k)}), k = 1, \dots, K, \\ \dot{\gamma}_{dc}^{(k)} = D_{sd} \left(\frac{\tau^{(k)}}{G} \right)^m \exp \left[- \frac{\Delta F}{k_B T} \right], k = 1, \dots, K, \\ \mathbf{D} = \mathbf{d}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор Коши на мезоуровне; $\boldsymbol{\pi}$ – тензор упругих свойств мезоуровня; $\mathbf{d}, \mathbf{d}^{in}$ – тензор деформации скорости и его неупругая составляющая на мезоуровне; $\dot{\gamma}_{ds}^{(k)}$ – скорость сдвига по k -й системе скольжения; $\dot{\gamma}_{dc}^{(k)}$ – скорость сдвига при переползании дислокаций; $\tau^{(k)}$ – действующее сдвиговое напряжение; $\tau_c^{(k)}$ – критическое напряжение сдвига; b – модуль вектора Бюргерса; d – размер зерна; G – модуль сдвига; D_{sd} – коэффициент диффузионной ползучести; ΔF – свободная энергия активации переползания; α, m – параметры материала; k_B – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; $H(\cdot)$ – функция Хэвисайда; K – количество систем скольжения для рассматриваемого типа кристаллической решетки.

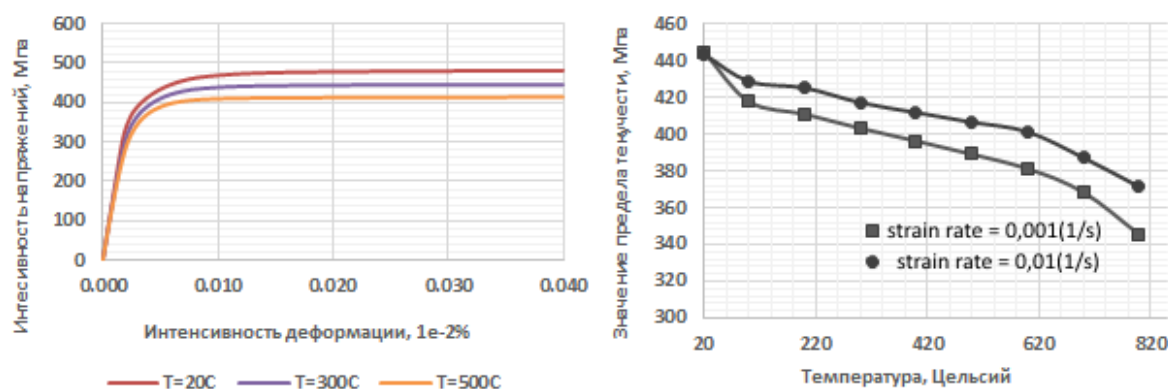


Рис. 2. Диаграмма напряженно-деформированного состояния для стали ст45 при различных температурах (слева); график зависимости предела текучести от температуры при различных скоростях деформирования (справа)

С использованием разработанной модели выполнена серия численных экспериментов по деформированию представительного макрообъема поликристалла, состоящего из 1000 случайно ориентированных кристаллитов с ОЦК решеткой. Схема деформирования соответствовала простому сдвигу. Параметры материала соответствовали стали Ст45. На основании численных экспериментов построены диаграммы напряженно-деформированного состояния представительного макрообъема (рис. 2, слева), на которых отчетливо наблюдается зависимость предела текучести от значения абсолютной температуры. Эта зависимость отражена на рис. 2 (справа); видно, что уменьшение значения предела текучести происходит как при повышении температуры, так и при уменьшении скорости деформирования материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-1298.2017.1.

Литература

1. Полухин П. И. Физические основы пластической деформации. Учебное пособие для вузов / П. И. Полухин, С. С. Горелик, В. К. Воронцов. – М.: Металлургия, 1982. – 584 с.
2. Voyiadjis G., A physically based constitutive model for fcc metals with applications to dynamic hardness / G. Voyiadjis, A. Almasri // *Mechanic of Materials*. – 2008. – 40. – pp. 549 – 563.
3. Фрост Г. Дж. Карты механизмов деформации / Г. Дж. Фрост, М. Ф. Эшби. – Ч.: Металлургия. – 1989. – 328 с.
4. Чадек Й. Ползучесть металлических материалов / Й. Чадек. – Москва.: Мир, 1987. 305 с.
5. Трусов П.В., Волегов П.С., Кондратьев Н.С. Физические теории пластичности: учебное пособие. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 244 с.

ЗАДАЧА О КАЧЕНИИ С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЦИЛИНДРОВ ПО ВЯЗКОУПРУГОМУ ОСНОВАНИЮ

Мифтахова А.Р.

Научный руководитель – академик РАН, д. ф.-м. н Горячева И.Г.

МФТИ, ФАКИ, Кафедра механики и процессов управления

E-mail: mif-almira@yandex.ru

В данной работе рассматривается контактная задача в двумерной постановке о качении периодической системы цилиндров по основанию, которое состоит из вязкоупругого слоя, сцепленного с жёсткой полуплоскостью. Модель Кельвина используется для описания характеристик слоя в нормальном и касательном направлениях. Цель работы – изучение взаимного влияния областей контакта при различных расстояниях между центрами цилиндров.

Рассмотрим задачу об установившемся качении со скоростью V системы цилиндров с периодом l по основанию в направлении оси Ox , толщина вязкоупругого слоя h . При качении область контакта каждого из цилиндров и основания делится на зоны сцепления и проскальзывания. Нормальные и касательные перемещения связаны с соответствующими напряжениями с помощью соотношений для одномерной модели Кельвина. В работе предлагается метод расчёта распределения нормального и касательного напряжений в области контактного взаимодействия. Проводится анализ влияния расстояния между цилиндрами на распределения контактных напряжений и конфигурацию области контакта при заданных свойствах вязкоупругого слоя.

Ранее проводились исследования зависимости контактных характеристик от расстояния между центрами цилиндров [1, 2], в которых деформационная составляющая коэффициента трения уменьшается при уменьшении расстояния между цилиндрами. В данной работе сначала проводится расчёт распределения нормального напряжения в области контакта, затем касательного напряжения, причём тангенциальные напряжения направлены противоположно скоростям проскальзывания.

Получены распределения нормальных и касательных перемещений точек поверхности вязкоупругого слоя и определена конфигурация области контакта. Благодаря неполному восстановлению деформаций свободной поверхности вязкоупругого слоя при достаточно малом расстоянии между неровностями при заданной нагрузке отличаются распределения нормальных напряжений в области контакта каждого цилиндра. В данной работе проведён анализ влияния плотности расположения цилиндров на распределение нормальных и касательных напряжений на площадке контакта и расположение границ зон сцепления и проскальзывания. Изучена зависимость коэффициента сцепления от расстояния между цилиндрами при заданной скорости качения и податливости вязкоупругого слоя.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14 29 00198).

Литература

1. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия // Москва: Наука. 2001. С. 480.
2. Любичева А.Н. Анализ взаимного влияния пятен контакта при скольжении периодической системы неровностей по вязкоупругому основанию винклеровского типа // Трение и износ. 2008. №2. Т. 29. С. 125–133.

ЭКРАН ОТ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА

Михалева А.Д.

Научный руководитель – доцент, д.т.н. Лебедев В. В.

МГСУ, Мытищинский филиал, Кафедра прикладной механики и математики

E-mail: anastasia.mihaleva0812@yandex.ru

Предлагается уменьшить перепад температуры в вентилируемом фасаде здания между стеной и внешней облицовкой. Это можно сделать с помощью тонкой теплопроводной фольги, например, из алюминия. Фольга закрепляется с внутренней стороны облицовки здания внутри вентилируемого фасада.

Введение. До 20% потерь тепла в зданиях обусловлено теплопередачей через стены. Одним из факторов теплопотерь является конвективный теплообмен вблизи нагретой стены [1]. Цель работы заключается в предложении способа уменьшения конвективного теплообмена доступными и дешёвыми средствами. Известен способ экранно-вакуумной теплоизоляции конструкций. Однако этот способ применяется в основном в космической технике, в криогенном производстве, в авиации, потому что дорог и технологически сложен, требует создать вакуум. В жилых зданиях на долю теплопотерь за счёт излучения приходится незначительная часть энергии. В основном тепло изнутри зданий теряется за счёт теплопроводности и конвекции [2-5]. В этой работе предметом исследования является только конвекция вследствие перемешивания объёмов воздуха с различной температурой и образования макровихрей между стеной и навесным фасадом.

Методы. Суть работы заключается в выравнивании температурного поля в пространстве вентилируемого фасада здания между внешней стороной стены и декоративной облицовкой. Обычно это пространство исключают из расчётов, не учитывают тепловые потоки, рассматривают только декоративные свойства фасада. Однако в зазоре между стенками существует градиент температурного поля, потому что, например, зимой внешняя сторона стены здания всегда более нагрета по сравнению с декоративной облицовкой. Следовательно, имеет место свободная конвекция.

Плотность конвективного теплового потока определяется уравнением Фурье и прямо пропорциональна градиенту температурного поля $q = -\lambda \cdot \text{grad}T$, где λ - коэффициент теплопроводности. Если в зазоре вентилируемого фасада уменьшить или даже полностью исключить перепад температур между стенкой и облицовкой, то свободная конвекция также уменьшится или даже полностью прекратится. Сделать это можно только после определения температурных полей в конструкциях.

Если посмотреть на стену здания сбоку, то она представляется отрезком. Значит, можно применить параболическое одномерное уравнение теплопроводности в частных производных. Для корректной формулировки задачи краевые условия требуют отдельного рассмотрения. Сначала вполне можно предложить краевые условия первого типа - термостатирование концов стержня. Это означает, что верхняя и нижняя часть стены, выходящие торцами за облицовку, имеют температуру окружающей среды, например 0°C . Начальные условия Коши для параболического уравнения в частных производных зависят от внешнего теплового воздействия на стержень. Сначала можно предположить, что в какой-то части стены, а значит и стержня, произошло скачкообразное повышение температуры, например, на 10°C . Температуру воздуха в зазоре вентилируемого фасада будем предполагать равной температуре облицовки. При возникновении градиента температуры сразу же появится дополнительная конвекция и дополнительные потери тепла. Материалы стены и облицовки различные, имеют разные коэффициенты температуропроводности – это тоже учитывалось при исследовании. Исследование свелось к решению двух смешанных начально-краевых задач для параболического уравнения в частных производных $\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial x^2}$; $U(0,t) = 0$; $U(L,t) = 0$; $U(x,0) = \varphi(x)$, где U – температурное поле, a^2 – коэффициент температуропроводности. Краевые задачи были решены методом Фурье. Решения были получены в виде рядов Фурье. По этим двум решениям была вычислена разность температур $\Delta U = \Delta T$ стенки и облицовки в каждой точке по высоте конструкции. Плотность свободного конвективного потока тепла прямо

пропорциональна этой разности температур. Полученные решения в виде рядов Фурье были введены в программу MathCAD-14 для анализа с различными коэффициентами теплопроводности. Были исследованы два вида конструкций. Во-первых, кирпичная стена и тонкий алюминиевый экран с небольшим воздушным зазором между ними. Во-вторых, деревянная стена и тонкий алюминиевый экран. Алюминиевый экран – это фольга. В каждом варианте были изучены два случая: экран снаружи стены и экран изнутри стены. Расчётная схема задачи – это два рядом расположенных стержня с термостатированными концами. На один стержень происходит резкое температурное воздействие, в какой-то части стержня температура скачкообразно возрастает. Воздух обладает сравнительно большим коэффициентом теплопроводности по сравнению с рассматриваемыми материалами, для него $a^2=1,9 \cdot 10^{-5}$ (м²/с), поэтому приближённо можно предположить такое же начальное распределение температуры в соседнем стержне. После температурного удара вследствие, например, открытия и закрытия форточки, температура в обоих стержнях начинает изменяться вследствие теплопроводности, но изменяется она по-разному, поэтому возникает разность температур и дополнительный свободный конвективный теплообмен с потерями тепла. Задача анализа свелась к определению потерь тепла при различных конструкциях, материалах и вариантах установки экрана относительно стены здания.

Даже начальное исследование свободного конвективного теплообмена в зазоре вентилируемого фасада позволило получить важный результат о возможности уменьшения теплопотерь сравнительно простым и дешёвым способом – установкой тонкого листа алюминиевой фольги на внутреннюю сторону декоративной облицовки. Иными словами, перед установкой декоративной облицовки на вентилируемый фасад надо с помощью строительного степлера прикрепить лист тонкой алюминиевой фольги, типа пищевой, на обрешётку, на которую будет крепиться облицовка.

Особенностью предлагаемой конструкции является строгий подбор материалов с вполне конкретными значениями коэффициента теплопроводности. Эти материалы надо расположить в правильном порядке. Например, алюминий, с большой теплопроводностью, всегда должен располагаться с внешней стороны здания за небольшим воздушным зазором вентилируемого фасада. Пока не удалось обосновать и обнаружить эффект снижения конвективных теплопотерь при внутреннем расположении алюминиевого экрана. Не для всех материалов алюминий будет экранировать свободный конвективный теплообмен в зазоре. Например, замена кирпича, казалось бы, более «теплым» деревом, естественно, улучшит тепловые свойства здания, но не уменьшит конвективный теплообмен в зазоре вентилируемого фасада. В изученных четырёх вариантах экранирования свободного конвективного теплообмена в зазоре вентилируемого фасада только первый вариант позволил обосновать существование эффекта, когда кирпичная стена снаружи экранируется алюминиевой фольгой. Физическая сущность этого явления заключается в быстрой передаче тепла от стены к алюминию, в приблизительно одинаковом распространении тепла по стене и алюминиевому экрану, в максимальном снижении разности температур в большинстве точек между стеной и экраном, в выравнивании температуры воздуха в зазоре вентилируемого фасада для уменьшения свободного конвективного теплообмена.

С практической точки зрения монтаж конвективного экрана не вызывает ни технологических, ни экономических трудностей.

Литература

1. Михалёва А.Д. Роль конвективного теплообмена в устойчивости ограждающей конструкции / Строительство — формирование среды жизнедеятельности. - Электронный ресурс: сборник трудов XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (26–28 апреля 2017 г., Москва). - М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. - Электрон. дан. и прогр. (73,7 Мб). — Москва : Изд-во Моск. гос. строит. Ун-та, 2017. — Режим доступа: <http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-devyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkrdostupa/> — Загл. с титул. экрана. - ISBN 978-5-7264-1660-1.- С.1023-1025.

2. Богословский В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. школа, 1982. 415 с.: ил.
3. Волков А.А., Б.И. Гиясов Б.И., Челышков П.Д., Седов А.В., Стригин Б.С. Оптимизация архитектуры и инженерного обеспечения современных зданий в целях повышения их энергетической эффективности // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. - №6, с. 111.
4. Гиясов Б.И. Влияние развития инфраструктуры городов на жилую среду// Вестник МГСУ- 2012. - №4.
5. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Изд. Авок-Пресс: 2006.

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ РЕЗИН С РАЗЛИЧНЫМИ АДГЕЗИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ

Морозов А.В., Маховская Ю.Ю.

ИПМех РАН

E-mail: morozovalexei@mail.ru

В работе представлены результаты теоретического моделирования и экспериментального исследования трения скольжения для двух типов резин, взаимодействующих с жестким контртелом. Исследуемые резины отличаются своими адгезионными свойствами, которые рассчитываются на основе экспериментальных данных, полученных при помощи атомно-силового микроскопа. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными зависимостями коэффициента трения от нормального давления и скорости скольжения, полученными при комнатной температуре в условиях сухого трения.

Предложен математический метод расчета коэффициента трения для вязкоупругого материала, скользящего по поверхности шероховатого недеформируемого контртела. Считается, что трение обусловлено гистерезисными потерями при передеформировании вязкоупругого материала поверхностными неровностями контртела, при этом учитывается влияние адгезионного притяжения между взаимодействующими телами на контактные деформации. Для описания вязкоупругого материала используется стандартная линейная вязкоупругая модель Кельвина-Фойгта, а в зазоре между взаимодействующими поверхностями действуют адгезионные силы, которые описываются моделью Можи-Дагдейла. Поверхность контртела считается жесткой, ее шероховатость моделируется периодической функцией. В результате решения поставленной контактной задачи были рассчитаны фактическая площадь контакта, распределение контактных напряжений и сила гистерезисного трения в зависимости от нормальной нагрузки, скорости, механических и адгезионных свойств вязкоупругого тела с учетом параметров шероховатости контртела (средней высоты выступов и среднего расстояния между ними).

Проведено экспериментальное исследование трения резин, работающих в уплотнениях с трением. Известно, что резины, взаимодействующие с твердой и гладкой поверхностью, имеют высокое значение коэффициента трения в основном за счет своих высоких адгезионных свойств. Исследованы два типа резин, отличающиеся адгезионными свойствами. С целью оценки этих свойств в данной работе предлагается расчетно-экспериментальный метод, который основан на обработке силовых кривых, полученных с помощью атомно-силового микроскопа. Параметры шероховатости поверхности контртела и резины были измерены также при помощи атомно-силового микроскопа. В работе проведены серии трибологических экспериментов и получены зависимости коэффициента трения от скорости скольжения в диапазоне от 1 до 100 мм/с и нормального давления в диапазоне от 0,1 до 0,3 МПа.

На основе полученных адгезионных свойств материала в работе приводятся результаты расчета коэффициента трения; выполняется сравнение полученных результатов с экспериментальными данными по трению двух типов резины по стальному основанию.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-08-00558.

ПОСТРОЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ПАРНЫХ СИЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРНОГО ПЕРЕХОДА ГЦК- ОЦК

Мушак Н. Д.

Научный руководитель – доцент, к.ф.-м.н. Подольская Е. А.
СПБПУ, Институт прикладной математики и механики, Кафедра Теоретической механики
E-mail: niky-m@yandex.ru

В настоящее время с развитием технологий изготовления конструкционных материалов приобретают актуальность задачи, связанные с определением механических, в том числе прочностных, свойств объектов, которые обладают практически бездефектной монокристаллической структурой. Понятие прочностных характеристик конструкционных материалов тесно связано с устойчивостью их внутренней структуры. При потере устойчивости кристаллическая структура тел претерпевает изменения, вследствие чего материал приобретает иные механические свойства. Под структурным переходом понимается процесс изменения внутренней упорядоченности атомов, и, вообще говоря, он связан с потерей устойчивости, поэтому изучение этих процессов является актуальной задачей в современной механике.

Простейшие парные силовые потенциалы (например, Леннард-Джонса, Морзе или Ми) позволяют моделировать пластичность, образование неоднородностей, в том числе трещин, температурное изменение свойств материала и структурные переходы. Такая универсальность располагает к широкому использованию парных силовых потенциалов, но существуют ограничения, которые не позволяют применять перечисленные потенциалы при описании поведения неплотнупакованных структур.

Целью данной работы является моделирование структурного перехода ГЦК-ОЦК с использованием двух парных силовых потенциалов особого вида, предложенных в данной работе. Эти потенциалы обеспечивают устойчивое ненапряжённое состояние для обеих структур, обладают большим, по сравнению с простейшими парными силовыми потенциалами, количеством параметров и, следовательно, позволяют описать широкий спектр материалов.

Первый потенциал представляет собой кусочно-заданную функцию, построенную на основе двух потенциалов Морзе, то есть обладающую двумя потенциальными ямами, благодаря чему обеспечиваются условия равновесия для ненапряженных ГЦК и ОЦК структур. Процесс построения потенциала, а также его анализ представлены в работе [1].

Второй потенциал также был построен на основе потенциала Морзе с добавочным слагаемым, отвечающим за наличие второго локального минимума. Данный потенциал является шестипараметрическим, а кусочно-заданный потенциал имеет тринадцать параметров.

Далее, проведено исследование устойчивости ГЦК структуры при конечных деформациях для обоих потенциалов. Алгоритм исследования приведен, например, в работе [2]. Получены зоны устойчивости в трехмерном пространстве деформаций, соответствующих растяжению/сжатию вдоль осей кубической симметрии ГЦК решетки (результат для первого потенциала представлен в работе [1]).

В процессе анализа областей устойчивости были идентифицированы структуры, которым соответствует та или иная область устойчивости: ГЦК, ромбическая гранецентрированная, а также ОЦК.

Построены кривые для одноосного нагружения вдоль одной из осей кубической симметрии и профили потенциальной энергии деформации на пути деформирования, соединяющем ненапряженные ГЦК и ОЦК структуры. Показано, что в отличие от потенциалов Леннарда-Джонса и Морзе, предложенные потенциалы позволяют получить профили энергии с двумя ярковыраженными локальными минимумами, соответствующими ненапряженным ГЦК и ОЦК структурам. Таким образом, данные потенциалы позволяют описывать фазовые переходы в металлах, сохраняя возможность аналитического анализа системы частиц.

Проведена верификация полученных потенциалов с помощью метода динамики частиц, в рамках которой было показано соответствие областей устойчивости полученным аналитически, а также исследованы двухфазные состояния вдоль линии одноосного сжатия ГЦК-ОЦК.

Литература

1. Мушак Н.Д., Подольская Е.А., Панченко А.Ю. Построение парного силового потенциала взаимодействия для моделирования структурного перехода ГЦК-ОЦК // Неделя науки СПбПУ. – 2017. – ИПММ – №. 1. – С. 184-186.
2. Podolskaya E. A. et al. Loss of ellipticity and structural transformations in planar simple crystal lattices // Acta Mechanica. – 2016. – V. 227. – №. 1. – P. 185.5.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТА ТРАНШЕЙНОГО БАРЬЕРА НА ПОДВИЖНУЮ ГРУППУ НАГРУЗОК С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ABAQUS

Низамаев Т. М.

Научный руководитель – профессор, д.ф.-м.н. Кузнецов С. В.
МГСУ, Институт фундаментального образования, Кафедра сопротивления материалов
E-mail: zaqwsx27@mail.ru

В данной работе построена численная модель для анализа распространения акустических волн в упругом полупространстве вдоль пути движения группы подвижных нагрузок. В программном комплексе Abaqus выполнено моделирование полупространства, на котором на заданном расстоянии приложены нагрузки, движущиеся с одинаковой скоростью. Скорость выбрана исходя из предыдущих исследований автора, является трансзвуковой и имеет максимальные амплитуды колебаний на поверхности полупространства на линии движения нагрузок.

На определенном расстоянии от линии движения был размещен траншейный волновой барьер и исходя из изменения его геометрических характеристик проведен анализ колебаний поверхности упругого полупространства, в зоне, находящейся за барьером.

Математический аппарат данной задачи рассмотрен ранее в [1], где с помощью преобразований Фурье и Лапласа получены выражения для перемещений и напряжений.

Надо отметить, что для компьютерного моделирования задачи о распространении волн в полупространстве или полуплоскости, чаще всего используют двумерную модель [2], которая требует меньших вычислительных ресурсов. В данной работе рассмотрена пространственная конечноэлементная модель, в расчетах применялись явные разностные схемы типа Лакса – Вендроффа.

Для анализа влияния геометрических характеристик полого траншейного барьера на амплитуду колебаний проведен ряд численных экспериментов, которые отчетливо показали зависимость изменения характерной картины колебаний поверхности за барьером от его геометрических характеристик. В частности, было обнаружено, что барьер в виде пустой траншеи или траншеи, заполненной акустически более мягким материалом, чем окружающий грунт, дает значительно лучшие результаты в снижении уровня колебаний, чем аналогичный барьер, заполненный акустически более жестким материалом.

Проведенные исследования могут представлять практический интерес в связи с вибрационной защитой зданий и сооружений, расположенных вблизи линий железнодорожного транспорта, трамвайных путей, линий наземного метро.

Литература

1. Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Волны в сплошных средах. -М.: Физматлит, 2004. 472 с.
2. L.Andersen, S.R.K. Nielsen. Reduction of ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway track. - Solid Dynamics and Earthquake Engineering 25 (2005), p.701-706.

ОПИСАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ В МОДЕЛЯХ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ

Овчинников Е. И.

Научный руководитель — доцент, к.ф.-м.н. Волегов П. С.

ПНИПУ, Факультет ПММ, Кафедра ММСП

E-mail: efm620@gmail.com

При моделировании процессов обработки металлов и(или) эксплуатации металлических изделий особое внимание необходимо уделять физически корректному описанию механизмов накопления поврежденности и разрушения, поскольку проблема разрушения, равно как и задача определения диапазонов допустимых внешних воздействий, является первостепенной для современной механики. Решение этой комплексной задачи осложнено тем, что известно большое количество механизмов накопления и эволюции поврежденности, а также теорий и моделей, позволяющих описывать процессы деформирования металлов. В рамках большинства из таких моделей потенциально возможно описание механизмов накопления поврежденности, однако для наиболее корректного описания этих механизмов необходимо наделять используемый математический аппарат совершенно определенным и прозрачным физическим смыслом. С этой точки зрения представляется вполне обоснованным применение подхода, основанного на физических теориях пластичности (ФТП), который широко используется при описании процессов интенсивных пластических деформаций металлов. Подход, основанный на ФТП, подразумевает непосредственное рассмотрение механизмов и носителей процессов деформирования на мезо- и микромасштабных уровнях, а деформируемый материал рассматривается как иерархическая система, в которой носители процесса деформирования распределены по различным масштабным и структурным уровням, поэтому для корректного описания таких систем необходимо строить многоуровневые модели.

В подавляющем количестве случаев в рамках ФТП ведущим механизмом неупругого деформирования выбирается скольжение краевых дислокаций по соответствующим кристаллографическим системам. В связи с этим, в работе предпринята попытка описания процесса образования микротрещин согласно механизму Зинера-Стро. Суть механизма заключается в том, что краевые дислокации, двигаясь в плоскости скольжения, встречают на пути препятствие и под действием напряжений тесно прижимаются друг к другу, из-за чего дислокационные экстраплоскости сливаются, а под ними образуется микротрещина. Трещина образуется в плоскости, перпендикулярной плоскости скольжения дислокаций. На первом этапе решена задача определения поля напряжений некоторого скопления дислокаций, поджатых у непреодолимого препятствия. Получена зависимость значения характерного расстояния между дислокациями в скоплении от количества дислокаций в скоплении. Под характерным расстоянием понимается то расстояние, на котором, напряжение, создаваемое скоплением дислокаций, равно критическому сдвиговому напряжению на рассматриваемой системе скольжения. Исходя из анализа результатов численных экспериментов, можно сделать вывод о том, что значение характерного расстояния достигает «насыщения» и перестает изменяться при количестве дислокаций в скоплении, равном некоторому пороговому значению, конкретная величина которого зависит от упругих и пластических характеристик исследуемого материала. Полученные на микроуровне результаты в дальнейшем будут использованы для описания процесса накопления поврежденности на мезоуровне.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-1298.2017.1.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В ПРИГРАНИЧНОЙ ОБЛАСТИ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

Озерных В.С.

Научный руководитель – доцент, к.ф.-м.н. Волегов П.С.

ПНИПУ, Кафедра ММСП

E-mail: ozernykh@yandex.ru

В работе рассматриваются физические механизмы упрочнения, а также некоторые механизмы накопления поврежденности в процессе неупругого деформирования поликристаллических материалов. Используется двухуровневая математическая модель деформирования многофазных материалов с учетом дислокационного упрочнения. Предложен способ учета внутренних полей напряжений, связанных с механизмом зернограничного упрочнения. Проведена оценка влияния внутренних полей напряжений, создаваемых дефектной структурой границ зерен, на подвижные решеточные дислокации. Изучен механизм формирования микроповреждений вблизи границ зерен в процессе деформирования.

При интенсивных пластических деформациях (ИПД) поликристаллических материалов важно учитывать эволюцию их внутренней структуры [1]. Так, например, для ИПД характерно появление внутренних полей напряжений в отдельных зернах, которые затормаживают или ускоряют движение других дислокаций; эти поля напряжений способствуют развитию процессов упрочнения, разупрочнения и накопления поврежденности, наблюдаемых на уровне мезоскопической структуры материала. Особое значение при этом имеют эволюционирующие в процессе деформирования поля внутренних («обратных») напряжений, возникающие вблизи границ зерен в результате формирования сложных дефектных структур в приграничной области.

Для описания процессов, приводящих к разрушению материала, удобно ввести понятие «поврежденность». Под поврежденностью понимается некоторая мера, характеризующая количество дефектов специального типа (микротрещин или микропор) в рассматриваемом материале в данный момент деформирования, непрерывно или скачкообразно изменяющаяся в процессе деформирования. При достижении этой мерой некоторого критического значения можно предсказать момент разрушения материала. По типу механизмов и локализации дефектов поврежденность можно разделить на внутризеренную и межзеренную. В рамках работы рассматривается механизм межзеренного накопления поврежденности, для которого характерно образование и развитие дефектов вблизи границ зерен.

Зернограничное упрочнение обусловлено увеличением напряжений, необходимых для движения дислокаций в зернах в направлении границы зерна. Кроме того, подобное увеличение внешних напряжений при некоторых условиях может привести к образованию микротрещин в приграничной области. Для удобства в описании процессов упрочнения и накопления поврежденности в материале вводится понятие дислокации ориентационного несоответствия (ДОН), под которой понимается некоторый линейный дефект на границе зерен, образовавшийся в результате перехода решеточных дислокаций из одного зерна в другое сквозь границу. ДОНы создают собственные поля напряжений, которые оказывают влияние на движение дислокаций во всех системах скольжения сопрягающихся зерен [2, 3]. В расчетах будем рассматривать только нормальную составляющую ДОН (рис. 1), поскольку создаваемые ей напряжения оказывают влияние на движение решеточных дислокаций внутри зерен.

В рамках работы предложен способ учета полей внутренних напряжений через введение «обратных» напряжений в соотношении для скоростей сдвигов дислокаций [1] по системам скольжения. Введено понятие эффективных касательных напряжений на системах скольжения, численно равных разности действующих и обратных касательных напряжений:

$$\tau_{eff}^{(k),(i)} = \tau^{(k),(i)} - \tau_{bs}^{(k),(i)}.$$

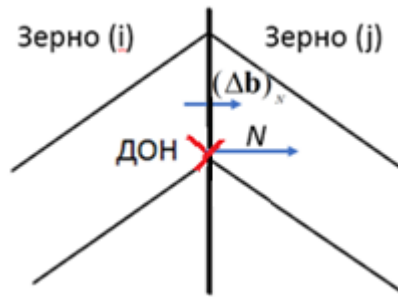


Рис. 1. Схема разложения ДОН на составляющие по отношению к границе

Для вычисления обратных напряжений $\tau_{bs}^{(k),(i)}$ рассматривается поле напряжений, создаваемое ДОН в каждой точке зерна, затем, используя это поле напряжений, рассчитывается среднее касательное поле напряжений на системах скольжения путем интегрирования по всему рассматриваемому зерну. Каждый ДОН вносит вклад во внутренние напряжения, поэтому важно оценить среднее число ДОН в границе. Поскольку ДОН образуются при проходе решеточных дислокаций через границу, то плотность ДОН на m -ой фасетке границы можно оценить с помощью плотности решеточных дислокаций:

$$\rho_{\text{ДОН}}^{(m)(i)} \approx \frac{N_{\text{ДОН}}^{(m)(i)}}{S^{(m)(i)}} \approx \frac{\rho_{\text{реш}}^{(i)} (d^{(i)})^2}{S^{(m)(i)}},$$

где d – размер зерна, $S^{(m)(i)}$ – площадь m -ой фасетки i -го зерна.

Предполагая однородное распределение ДОНов вдоль границы получаем, что $N_{\text{ДОН}}^{(m)(i)} \approx \rho_{\text{реш}}^{(i)} (d^{(i)})^2$. Общее среднее поле напряжений, создаваемое всеми ДОНами на рассматриваемой фасетке m границы зерна можно определить, как произведение количества ДОНов на этой фасетке и среднего касательного напряжения, создаваемого одним ДОНом.

Проведена серия численных экспериментов по деформированию поликристалла из 1000 зерен с учетом влияния поля внутренних напряжений. Характеристики модельного материала соответствуют стали 45. Характерная кривая деформационная кривая, получаемая в результате численных экспериментов, представлена на рис. 2.

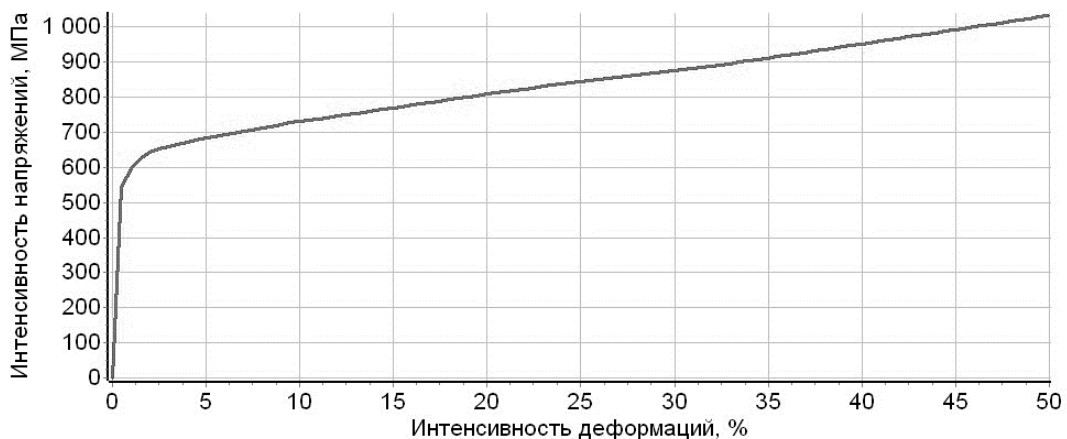


Рис. 2. Кривая деформирования стали 45 с учетом внутренних напряжений

Из рис.2 видно, что материал активное упрочнение материала происходит после достижения примерно 4% по интенсивности деформаций, т.е. для продолжения деформирования необходимо повышать прикладываемые усилия.

Кроме того, в работе показано, что внутренние поля напряжений, создаваемые ДОНами,

оказывают существенное влияние на движение решеточных дислокаций: появление таких полей напряжений ДОН может привести к блокировке активной системы скольжения в направлении границы, что в свою очередь, приведет к формированию скоплений дислокаций одного знака в приграничной области. Дальнейшее неупругое деформирование по такой системе скольжения приведет к формированию микротрещины. Получено, что в процессе деформирования поврежденность материала может снизиться вследствие активизации вторичных систем скольжения, в результате чего дислокации «обходят» барьер, образованный на рассматриваемой системе скольжения. Получены критические значения эффективных напряжений, достижение которых может привести к появлению микротрещин вблизи границ зерен.

Предложенный способ учета зернограницного упрочнения позволяет явным образом учесть средний размер зерна в материале. Получено, что для материала с более мелким зерном предел текучести оказывается выше [4, 5].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-1298.2017.1.

Литература

1. Трусов П.В., Волегов П.С., Нечаева Е.С. Многоуровневые физические модели пластичности: теория, алгоритмы, приложения// Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4-4. – С. 1808-1810.
2. Кондратьев Н.С., Трусов П.В. Описание упрочнения систем дислокационного скольжения за счет границ кристаллитов в поликристаллическом агрегате// Вестник ПНИПУ. Механика. – 2012. – № 3. – С. 78-97.
3. Trusov P.V., Shveykin A.I., Nechaeva E.S., Volegov P.S. Multilevel models of inelastic deformation of materials and their application for description of internal structure evolution// Physical Mesomechanics. – 2012. – Т. 15, № 3-4. – С. 155-175.
4. Озерных В.С., Волегов П.С. Описание механизмов упрочнения при неупругом деформировании поликристаллов// Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2016. – Т.21, №3. – С. 1203-1206.
5. Озерных В.С. Исследование влияния распределения зерен по размерам на деформационное поведение поликристаллических материалов// Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, – 2016. – Т. 1. – С. 234– 238.

ГРАДИЕНТ ПЛОТНОСТИ МАТЕРИАЛА КАК НЕЗАВИСИМАЯ СТЕПЕНЬ СВОБОДЫ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

Окатьев Р.С., Зубко И.Ю.
ПНИПУ

E-mail: okatjevrs@gmail.com

С помощью принципа наименьшего действия Гамильтона получены уравнения движения и граничные условия для среды с градиентом плотности в качестве независимой кинематической переменной.

Введение. Развитие существующих и построение новых неклассических моделей сплошных сред является актуальной задачей, связанной с необходимостью предсказывать механические свойства и описывать поведение при различных воздействиях новых наноструктурированных композитов, проектируемых аддитивных и функционально-градиентных материалов, метаматериалов. Свойства таких материалов сильно зависят от их микроструктуры, зачастую наблюдается сильная неоднородность физических свойств вплоть до атомарного уровня. Классические модели механики сплошной среды обычно оказываются в таком случае неприменимыми, так как не учитывают поведение среды на мезо- и микромасштабах.

В данной работе под неклассическими моделями понимаются среды, отличающиеся от классического континуума Коши. Широко распространенными примерами таких моделей являются континуум Коссера [1] (микрополярный континуумом), а также микроморфный континуум, который был предложен независимо Миндлином [2] и Эрингеном [3].

Формализм. Математически поведение данных сред можно описать, приписывая каждой точке континуума набор трех некомпланарных полярных векторов $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \mathbf{d}_3$ – $\mathbf{d}$ -векторов или директоров. Тогда микродеформация среды будет выражаться в изменении их метрических характеристик и взаимной ориентации [4].

В случае жесткой деформации набора директоров, то есть поворота как единого целого, имеем микроморфную среду. Модель, в рамках которой помимо жесткого поворота директоры могут только удлиняться или укорачиваться, называется *microstretch-continua* [5]. Наконец, если позволить директорам изменять свое относительное положение, получим микроморфный континуум. Таким образом микроморфную среду можно считать обобщением континуума Коссера.

Подходы. При построении новых моделей можно выделить два основных подхода [6]. Первый основан на записи уравнений баланса физических величин и формулировки определяющих соотношений. При этом задача построения таких соотношений является весьма нетривиальной. Также возникает проблема в записи корректных граничных условий.

Второй подход основан на применении различных вариационных принципов, в основном принципа наименьшего действия Гамильтона и принципа виртуальных мощностей. При таком подходе граничные условия формулируются «автоматически» из получаемого вариационного уравнения. Однако зачастую необходимо дополнительно устанавливать применимость тех или иных принципов, например, принцип Гамильтона следует применять только к консервативным системам.

При использовании вариационного подхода необходимо определять вид функционала. Для принципа Гамильтона таким функционалом является лагранжиан среды, который в общем случае является скалярнозначной функцией независимых кинематических переменных среды, а также их градиентов и производных по времени. Определение вида лагранжиана является задачей, идентичной по сложности задаче построения определяющих соотношений.

В работе рассматривается среда, для которой независимой кинематической переменной является градиент плотности $\nabla \rho$. Показано, что при этом независимым является также второй деформационный градиент $\nabla \mathbf{F}^T = \nabla(\nabla_0 \mathbf{r})$ [7]. Здесь ∇_0 и ∇ – операторы градиента

в отсчетной и текущей конфигурация соответственно, $\mathbf{r}$ – радиус-вектор в текущей конфигурации, $\mathbf{F} = (\nabla_0 \mathbf{r})^T$ – деформационный градиент. Лагранжиан такой среды представляется в виде

$$L = L(\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, \mathbf{F}^T, \nabla \mathbf{F}^T), \quad (6)$$

где $\mathbf{u}$ – вектор перемещений. Из принципа наименьшего действия были получены уравнения движения такой среды и корректные граничные условия в приближении малых деформаций:

$$\begin{cases} \rho_0 \mathbf{f} + \nabla_0 \cdot \mathbf{P}_I - \nabla_0 \cdot \left(\nabla_0 \cdot \frac{\partial W}{\partial \nabla_0 \mathbf{F}^T} \right) = \rho_0 \ddot{\mathbf{u}}, \\ \left(\mathbf{p} + \mathbf{N} \cdot \left[\nabla_0 \cdot \frac{\partial W}{\partial \nabla_0 \mathbf{F}^T} - \mathbf{P}_I \right] + \nabla_0 \cdot \left(\mathbf{N} \cdot \frac{\partial W}{\partial \nabla_0 \mathbf{F}^T} \right) \right) \Big|_{\partial V_0} = 0, \\ \left(\mathbf{v} \cdot \left(\mathbf{N} \cdot \frac{\partial W}{\partial \nabla_0 \mathbf{F}^T} \right) \right) \Big|_{\partial \partial V_0} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь ρ_0 – плотность среды в отсчетной конфигурации, $\mathbf{P}_I$ – первый тензор Пиола-Кирхгофа, $\mathbf{N}$ – нормаль к поверхности ∂V_0 рассматриваемого объема V_0 , $\mathbf{v}$ – нормаль к контуру $\partial \partial V_0$, ограничивающему поверхность ∂V_0 .

Литература

1. Cosserat E., Cosserat F. Theorie des Corps Deformables – Paris: Hermann, 1909.
2. Mindlin R.D. Micro-structure in linear elasticity// Archive of Rational Mechanics and Analysis, 1964. – N1. – Pp. 51-78.
3. Eringen A.C., Suhubi E.S. Nonlinear theory of simple micro-elastic solids// Int. J. Engng. Sci., 1964. – V.2. – Pp. 189-203.
4. Ковалев В.А., Радаев Ю.Н. Каноническая полевая теория термоупругого континуума с тремя полярыными директорами// Вестник ЧПГУ им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2016. – №3(29). – С. 11-40.
5. Eringen A.C. Theory of thermos-microstretch elastic solids// Int. J. Engng. Sci., 1990. – V.28. – Pp. 1291-1301.
6. Auffray N., dell’Isola F., Eremeyev V.A., Madeo A., Rosi G. Analytical continuum mechanics à la Hamilton-Piola least action principle for second gradient continua and capillary fluids// Mathematics and Mechanics of Solids, 2015. – V.20. – Iss.4. – Pp. 375-417.
7. Zubko I.Yu. Measures of discontinuities for crystal damaging// Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, AIP Conference Proceedings, 2017. – V. 1895. – Pp. 080006-1-7. (doi: 10.1063/1.5007400).

МОДЕЛЬ АДДИТИВНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ СВОДЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ УПРУГИХ И ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ УПРАВЛЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Паршин Д.А.
ИПМех РАН,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
E-mail: parshin@ipmnet.ru

В рамках линейной механики наращиваемых тел построена квазистатическая модель процесса аддитивного изготовления на гладком жестком горизонтальном основании тяжелого полуциркульного свода из упругого либо стареющего вязкоупругого материала методом послойного утолщения первоначально установленной заготовки. Модель учитывает влияние сил тяжести на протяжении всего процесса. Поставлены и аналитически решены соответствующие неклассические начально-краевые задачи. Проведены многочисленные числовые расчеты. Обнаружена возможность формирования выгодных распределений контактных напряжений на подошвах готового свода путем создания предварительных напряжений в присоединяемых к нему в процессе изготовления конструктивных элементах и временного приложения управляющей нагрузки к малой части его поверхности.

Введение. В представляемой работе предлагается математическая модель процесса квазистатического деформирования полуциркульной сводчатой конструкции, возводимой аддитивным методом из вязкоупругого стареющего либо чисто упругого материала в условиях действия сил тяжести, учитывающая технологические возможности приложения произвольной симметрично распределенной нагрузки к наружной цилиндрической поверхности свода и создания произвольных начальных напряжений в конструктивных элементах, присоединяемых в процессе возведения свода к его внутренней цилиндрической поверхности. Даются постановки и строятся точные аналитические решения соответствующих пространственно двумерных начально-краевых задач механики для случая плоского деформированного состояния рассматриваемой конструкции в приближении малой деформации. Эти решения позволяют проследить эволюцию напряженно-деформированного состояния возводимой конструкции от момента установки на основание ее первоначально выполненной заготовки до сколь угодно отдаленного момента времени после завершения процесса возведения. Постановки краевых задач на этапах после начала и по завершении аддитивного процесса возведения являются неклассическими и формулируются на основе подходов механики наращиваемых деформируемых твердых тел [1–9]. Аналитические решения сформулированных задач строятся в рядах и квадратурах путем разделения переменных с последующим решением для каждой точки конструкции некоторого интегрального уравнения по времени.

Постановка задачи. Пусть в момент времени $t = t_0 > 0$ на жесткое горизонтальное основание установлена полукруглая цилиндрическая арочная заготовка и закреплена на нем посредством скользящей заделки, обеспечивающей свободное скольжение подошв арки по основанию без отслоения. Заготовка выполнена заранее без остаточных напряжений из однородного изотропного вязкоупругого стареющего материала, изготовленного в момент времени $t = 0$ и описываемого уравнением состояния $\mathbf{H}_{\tau_0(\mathbf{r})}[\mathbf{T}(\mathbf{r}, t) / G(t)] = 2\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + 2\nu / (1 - 2\nu) \mathbf{1} \operatorname{tr} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$, в котором: $\tau_0(\mathbf{r})$ — момент возникновения напряжений в точке $\mathbf{r}$; $\mathbf{T}$ и $\mathbf{E}$ — тензоры напряжений и малой деформации, $\mathbf{1}$ — единичный тензор 2-го ранга; $\mathbf{H}_s$ — интегральный оператор вязкоупругости, $\mathbf{H}_s f(t) = f(t) - \int_s^t f(\tau) G(\tau) \partial / \partial \tau [G(\tau)^{-1} + \omega(t, \tau)] d\tau$; $G(t)$ — упругий модуль сдвига, $\omega(t, \tau)$ — мера ползучести при чистом сдвиге, $\nu = \text{const}$ — коэффициент Пуассона. Начиная с некоторого момента $t_1 \geq t_0$ и до момента $t_2 > t_1$ происходит постепенное утолщение установленной заготовки посредством непрерывного присоединения к ее внутренней цилиндрической поверхности равномерных по толщине элементарных слоев дополнительного материала, идентичного материалу заготовки по возрасту и свойствам. Внутренняя поверхность конструкции не загружается на протяжении всего процесса

возведения и после его окончания. Действие скользящей заделки распространяется на всю текущую площадь подошв свода, увеличивающуюся за счет присоединения материала.

Полученные результаты. На основании построенных аналитических решений, описывающих в рамках предложенной модели процесс деформирования рассматриваемой аддитивно возводимой конструкции, в работе выполнены многочисленные числовые расчеты. В расчетах принимаются аппроксимации механических характеристик материала и значения входящих в них параметров, согласующиеся с экспериментальными данными по ползучести ряда сортов бетона.

При анализе результатов расчетов обнаружено, что на периферийных участках подошв не слишком толстостенной заготовки возникают зоны отрицательного контактного давления — положительных контактных напряжений. Установлено, что при дальнейшем наращивании такой арки по внутренней поверхности ненапряженными элементами, в том числе и после значительного утолщения стенки, эти зоны не только не исчезают, но даже увеличиваются в размерах. Добиться лишь некоторого снижения максимальной величины отрывающих напряжений в указанных зонах относительно первоначального значения удастся в процессе интенсивного изготовления всей конструкции, причем из «молодого» материала, когда достаточно мал интервал времени между изготовлением материала ($t = 0$) и завершением наращивания ($t = t_2$). Технологически обнаруженный факт означает, что на протяжении всего рассматриваемого процесса возведения арочной конструкции из не слишком толстостенной заготовки на эту конструкцию со стороны основания должны постоянно действовать некоторые удерживающие связи, не допускающие ее отслоения. Однако с эксплуатационной точки зрения более важным является то обстоятельство, что эти связи должны сохраняться и в течение неограниченного интервала времени после окончания возведения, что в определенных ситуациях может оказаться нежелательным. Поэтому актуальна постановка вопроса о поиске такого варианта моделируемого технологического процесса, который при сохранении условия скользящей заделки подошв в процессе возведения приводил бы к исчезновению отрывающих напряжений на подошвах после завершения этого процесса.

Стремление к отрыву от гладкого основания внешних участков подошв не слишком толстостенной тяжелой арки вызывается, очевидно, тем, что основная часть массы такой конструкции проецируется не на ее опорные площадки (как в случае очень толстой арки), а на часть основания, расположенную между ними, а силы трения, способные компенсировать возникающий при этом изгибающий момент, отсутствуют. Понятно, что исправить эту ситуацию можно, например, организовав поддержку арки возле ее вершины с помощью подвеса с контролируемой силой натяжения. В этом случае вес находящегося между опорами материала будет частично воспринят подвесом, и материал, расположенный над подошвами, сможет полностью прижать их к основанию. Это кажется совершенно очевидным по отношению к арке, которая была изготовлена прежде, чем установлена на основание. Вопрос же состоит в том, возможно ли с помощью локальной силовой поддержки арки, возводимой непосредственно на гладком основании, сформировать в ней такое поле напряжений, чтобы после окончания возведения и отсоединения подвеса готовая конструкция стояла, не отрываясь, на гладком основании, на котором более не действуют удерживающие связи. В работе выполнены расчеты для поддерживающей силы, распределенной по малому участку наружной цилиндрической поверхности, компенсирующей до начала и во время наращивания арки некоторую заданную долю ее текущего веса, а после окончания наращивания быстро убывающей до нуля. Результаты расчетов показывают, что финальное (устанавливающееся спустя длительное время после окончания возведения и снятия поддерживающей нагрузки) распределение контактного давления на подошву возведенной аддитивным методом тяжелой арки можно сделать всюду положительным, причем практически равномерным в исходной части конструкции. Этого удастся добиться, если в дополнение к локальной силовой поддержке арки в процессе возведения еще использовать для ее наращивания не свободные от начальных напряжений, а предварительно растянутые в окружном направлении конструктивные элементы. В таком случае даже тонкостенный тяжелый свод, изготовленный непосредственно на основании,

после освобождения от удерживающих подошвы связей и поддерживающей поверхностной нагрузки будет сколь угодно долго стоять на гладком основании, не отрываясь от него ни в одной точке. Как отмечено выше, такое невозможно даже у весьма толстостенных арочных конструкций, установленных на гладкое основание сразу в готовом виде.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проектов 18-01-00920-а, 18-01-00770-а.

Литература

1. Манжиров А.В., Паршин Д.А. Возведение арочной конструкции с использованием аддитивной технологии под действием силы тяжести // Изв. РАН. МТТ. 2015. № 5. С. 94–107.
2. Манжиров А.В., Паршин Д.А. Влияние режима возведения на напряженное состояние вязкоупругой арочной конструкции, возводимой с использованием аддитивной технологии под действием силы тяжести // Изв. РАН. МТТ. 2015. № 6. С. 69–91.
3. Manzhirrov A.V., Parshin D.A. Accretion of spherical viscoelastic objects under self-gravity // Lecture Notes in Engineering and Computer Science. 2016. Vol. 2224. No. 1. P. 1131–1135.
4. Манжиров А.В., Паршин Д.А. Применение преднапряженных конструктивных элементов при возведении тяжелой вязкоупругой арочной конструкции с использованием аддитивной технологии // Изв. РАН. МТТ. 2016. № 6. С. 93–104.
5. Паршин Д.А. Аналитические решения задачи об аддитивном формировании неоднородного упругого шарового тела в произвольном нестационарном центральном поле сил // Изв. РАН. МТТ. 2017. № 5. С. 70–82.
6. Parshin D.A., Hakobyan V.N. Additive manufacturing of a cylindrical arch of viscoelastic aging material under gravity action at various modes of the process // Procedia IUTAM. 2017. Vol. 23. P. 66–77.
7. Parshin D.A. The technological stresses in a vaulted structure built up on a falsework // Advanced Structured Materials. 2017. Vol. 46. P. 377–386.
8. Parshin D.A., Manzhirrov A.V. Quasistatic problems for piecewise-continuously growing solids with integral force conditions on surfaces expanding due to additional material influx // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 937. P. 012038.
9. Manzhirrov A.V., Parshin D.A. Modeling spherical accretion of aging viscoelastic objects under self-gravitation // IAENG Transactions on Engineering Sciences: Special Issue for the International Association of Engineers Conferences 2016. Vol. II. World Scientific Publishing, 2018. P. 14–27.

РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОФИЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБОДЬЕВ

Петрухин Н.В.

Научный руководитель — профессор, д.т.н. Панфилов Г. В.
ТулГУ, Механико-технологический факультет, Кафедра механики пластического
формоизменения
E-mail: mpf-tula@rambler.ru

В совокупности проблем, решаемых современной промышленностью, актуальной является проблема обработки металлов, с максимальной производительностью, технологичностью, экономией материалов, а также вопросы, связанные с созданием универсального оборудования и оснастки.

В данном контексте остро стоит вопрос разработки широкономенклатурных установок для различных технологических процессов профилирования металлов с целью создания широкого спектра профилей для всевозможных уплотнительных изделий, таких как: прокладки, сальники, обжимы, гидроуплотнители и т.д.

Качество металлических профилей для таких деталей прямо влияет на показатели надёжности оборудования, т.е. на долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость и безотказность.

Существует множество типов оборудования, позволяющего получать профилированные металлические ободья, но одним из их главных недостатков является узкие технологические возможности по изменению геометрии профиля и габаритных размеров детали, а также их относительная дороговизна, не позволяющая существенно снизить себестоимость конечного изделия.

В ходе литературного и патентного поиска было выяснено, что существует возможность для изменения конструкции оборудования с целью решения вышеупомянутых проблем. Была разработана специальная конструкция установки для технологического процесса профилирования металлических ободьев. Она отличается низкой себестоимостью, широким диапазоном выбора формы профиля, а также размеров получаемых ободьев, что существенно снижает количество необходимого оборудования для исследуемого процесса формоизменения. Проводится моделирование её работы в программном комплексе Qform, с целью нахождения основных зависимостей, отражающих характер поведения материала в ходе деформации. Создана трёхмерная модель в системе автоматизированного проектирования SolidWorks, позволяющая визуализировать работу установки, выполнять прочностные расчёты, а также необходимая в будущем для создания комплекта конструкторской документации с целью внедрения её в существующие технологические процессы.

Ведётся работа по оформлению заявки на патентование разработанного устройства, а также создания экспериментального образца установки, который позволит провести необходимые натурные испытания для подтверждения теоретических расчётов.

Стоит отметить, что внедрение подобного рода приспособлений позволит не только снизить себестоимость профилирования металлических ободьев, но и повысить качество получаемых деталей.

ОПИСАНИЕ ПРЕРЫВИСТОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ ПОМОЩИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Попов Ф.С.

Научный руководитель – профессор, д.ф.-м.н. Трусов П. В.
ПНИПУ

E-mail: popovfyodor@yandex.ru

Работа посвящена исследованию и моделированию одного из наиболее интересных проявлений диффузионных процессов в деформируемых металлах и сплавах – эффекту прерывистой пластичности. На основе существующих моделей рассматриваемого эффекта не представляется возможным физически корректное обоснование процессов, происходящих во время неупругого деформирования. В работе реализуется дискретно-континуальный подход для описания дислокационной динамики в рамках многоуровневой модели. Получены зависимости критических напряжений и плотностей дислокаций по системам скольжения от деформаций.

В настоящее время при изготовлении различных деталей в автомобильной и авиационной промышленности, которые должны обладать достаточной коррозионной устойчивостью и устойчивостью к внешним воздействиям, используются различные сплавы из алюминия. Однако при существующих режимах обработки металлов и сплавов давлением часто возникает ряд негативных эффектов, которые, в свою очередь, снижают коррозионную устойчивость, приводят к снижению предела текучести и др. Одним из наиболее известных эффектов, возникающих в деформируемых сплавах, является динамическое деформационное старение (ДДС) [1]. При повышенных температурах и невысоких скоростях деформирования ДДС приводит к возникновению прерывистой пластичности (ПП) [2]. С точки зрения макроэкспериментов на одноосное нагружение образцов ПП проявляется на деформационных кривых в виде повторяющихся неоднородностей: ступенек или зубцов, что изображено на рис.1.

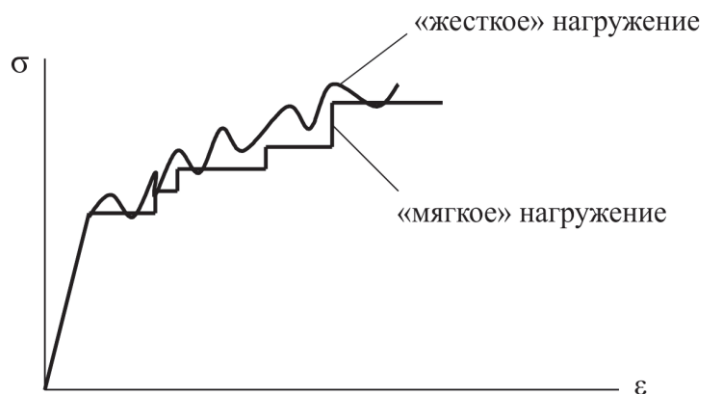


Рис.1. Диаграммы одноосного «жесткого» и «мягкого» нагружений

На макрообразцах ПП проявляется в виде полос сдвига и соответствующих шероховатостей поверхности. Одной из актуальных задач является описание процесса ДДС, приводящего к возникновению ПП, с использованием моделей дислокационной динамики. Дислокационные модели для описания внутренней структуры представляются более физически обоснованными и наглядными по сравнению с существующими макрофеноменологическими моделями. Однако известные дислокационные модели [3,4] требуют дальнейшего развития. В предлагаемой работе вводятся понятия мобильных и имобильных дислокаций, рассматриваются различные взаимодействия дислокаций друг с другом, а также с атомами примеси и барьерами. Возникновение ПП обусловлено не только взаимодействием дислокаций, но и диффузионными процессами, происходящими во время пластического деформирования. На основе данного факта в работе вводится следующее уточнение: процесс диффузии можно представить как совокупность двух процессов, а именно – решеточной диффузии и туннельной диффузии, происходящей вдоль линий дислокаций. Последнее, в свою очередь, обуславливает непостоянство коэффициентов диффузии, их зависимость от текущей внутренней структуры, в частности, от значений

плотностей дислокаций и плотностей барьеров по системам скольжения.

На текущем этапе работы получены зависимости плотностей дислокаций и критических напряжений по СС от деформаций для монокристаллического образца без учета диффузионных эффектов; на основе полученных результатов можно судить о применимости предлагаемой дислокационной модели для описания рассматриваемых процессов неупругого деформирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-41-590694-р_а).

Литература

1. Трусов П.В., Чечулина Е.А. Прерывистая текучесть: физические механизмы, экспериментальные данные, макрофеноменологические модели // Вестник ПНИПУ Механика. –2014. – №3. – С.186–232.
2. Portevin A., Le Chatelier F. Sur unphenomene observe lors de l'essai de traction d'alliages en cours de transformation // Compt. Rend.Acad. Sci. Paris.– 1923.– Vol. 176. – Pp. 507–510.
3. Kubin, L. P.,Estrin, Y. Evolution of dislocation densities and the critical conditions for the Portevin-Le Châtelier effect // ActaMetallurgica et Materialia– 1990.– Vol. 38.– Pp. 697-708.
4. Estrin Y., Kubin L.P. Local strain hardening and nonuniformity of plastic deformation // ActaMetallurgica– 1986.– Vol. 34, – Pp. 2455-2464.

РАЗРАБОТКА ОСНАСТКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ПРОЦЕССА ПРЯМОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

Поцелуев К.О.

Научный руководитель – профессор, д.т.н. Панфилов Г. В.
МАИ, Политехнический институт, Кафедра механики пластического формоизменения
E-mail: Potseluev.97@mail.ru

Моделирование различных типов оснастки и инструмента для процессов формоизменения материалов сопряжено с рядом технологических трудностей и задач, решение которых часто бывает необходимо для успешной отработки новых технологий и приемов, используемых в производстве. В настоящее время в машиностроительной отрасли, а также научных исследованиях, связанных с всевозможными производственными процессами в области обработки металлов давлением широкое распространение получили методы исследования и анализа процессов формоизменения с применением многофакторного эксперимента, что в значительной степени повышает качество и достоверность теоретических исследований.

В работе рассматриваются различные вопросы, возникшие при проектировании оснастки, предназначенной для проведения многофакторного эксперимента с использованием программного комплекса Qform 3D. Исследуется процесс прямого выдавливания, причем используются конструкция универсального штампа со сменными матрицами, втулками и пуансонам, что дает возможность провести необходимое число опытов с разной конфигурацией штамповой оснастки. Нахождение зависимостей изменения напряженно-деформированного состояния заготовки и силовых параметров при формоизменении с заданными параметрами и граничными условиями является ключевой задачей при проведении многофакторного эксперимента в среде Qform 3D. Кроме того, проблемы, решаемые при разработке чертежей и другой конструкторской документации различных видов штамповой оснастки для экспериментов с использованием метода конечных элементов, являются так же актуальными и для дальнейшей разработки и изготовления реального инструмента для прямого выдавливания.

Изначально необходимо было решить вопрос об интервале варьирования габаритными размерами заготовок, а так же толщиной стенок изделия (в нашем случае за базовый технологический процесс и реально существующую деталь, которую можно получить методом прямого выдавливания, была взята технология получения гильзы Luger 9x19). Например, установлено, что оптимальным интервалом варьирования фактора внешнего диаметра заготовки для рассматриваемой схемы деформирования был промежуток от 1 до 2 исходных диаметров заготовки, используемых в реальном технологическом процессе.

Непосредственно при разработке чертежей и 3д моделей оснастки был решен вопрос механической обработки рабочих поверхностей матриц и пуансонов, а так же проблема применения матриц с различной конфигурацией геометрии рабочей полости: коническая, коническая с пояском, цилиндрическая и т.д. Важно учесть, что подобная работа была проведена и для пуансонов, которые имеют не только различные размеры по диаметру, но и разную геометрическую конфигурацию рабочего профиля: плоская, коническая, сферическая выгнутая, сферическая вогнутая и т.д.

Итогом работы является полный пакет конструкторской документации с реальными 3Д моделями, которые можно использовать как для проведения экспериментов в Qform 3D, так и для изготовления реальной штамповой оснастки, используемой для натурных экспериментов, что может существенно расширить исследовательский потенциал работы, а так же позволить провести сравнительный анализ моделирования процессов холодного выдавливания с помощью метода конечных элементов и реального процесса выдавливания.

ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ОПЕРАЦИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫТЯЖКИ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ДЕТАЛИ В КОНИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ ИЗ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА В РЕЖИМЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Романов П.В.

Научный руководитель – доцент, к.т.н. Платонов В.И.,
ТулГУ, Политехнический институт, Кафедра механики пластического формоизменения
E-mail: mpf-tula@rambler.ru

Современные тенденции развития промышленного производства предполагают переход к использованию новых материалов и технологий их обработки. К сожалению, большинство труднодеформируемых и высокопрочных материалов, активно используемых в авиационной и ракетно-космической технике, трудно поддаются классическим операциям обработки давлением при комнатной температуре. На производстве возникают огромные проблемы, связанные с трудностями проектирования и подготовки новых технологических процессов, т.к. зачастую отсутствуют не только данные механических характеристик используемых материалов, но и методики расчетов элементарных операций формоизменения труднодеформируемых материалов, требующие предварительного нагрева и поддержание специальной безокислительной атмосферы.

Расчет операций обработки металлов давлением с использованием титановых сплавов осложнен тем, что титановые сплавы относятся к труднодеформируемым материалам при обычных условиях штамповки из-за их низкой пластичности. Поэтому важным фактором при изотермической штамповке являются сведения о пластических свойствах материала при заданных температурных режимах изотермической штамповки. Основной характеристикой пластичности является относительное равномерное удлинение, определяемое по результатам испытания образца при растяжении путём измерения значения его удлинения после растяжения. При комнатной температуре материал обладает значительной плоскостной анизотропией. При повышении температуры испытания до определенных величин плоскостная анизотропия сохраняется. При температуре нагрева, когда в заготовке происходят фазовые и структурные изменения, материал становится трансверсально-изотропным и ориентация заготовки относительно направления к прокатке не оказывает влияние на качество получаемого изделия.

Учет всех изменений, происходящих в материале полуфабриката, требует огромного количества экспериментов и их статистической обработки. Основными факторами влияющими на возможность получения бездефектной детали в условиях изотермической штамповки являются температура, скорость и время выдержки. Зная о закономерностях изменения этих факторов всегда имеется возможность назначить рациональные технологические режимы формоизменения заготовки.

Таким образом, при рассмотрении процесса вытяжки заготовки в коническую матрицу при повышенных температурах предполагается, что исходный материал трансверсально-изотропен. Предполагается наличие потенциала скоростей деформации при ползучести и подчинение ассоциированному закону течения. В зависимости от температурных режимов и вида используемого материала заготовки его поведение можно описать уравнениями состояния кинетической или энергетической теории ползучести и повреждаемости. Подразумеваем, что процесс осуществляется при плоском напряженном состоянии.

Приведенные предположения и допущения использованы при разработке математической модели операции изотермической вытяжки в конической матрице для оценки напряжений, деформаций и силовых режимов.

ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Румачик М.М.
Walter+bai AG
E-mail: makcimilian@bk.ru

Слово «композит» все меньше удивляет, - оно прочно укрепляется во многих отраслях, имея сильные конкурентные преимущества перед металлами и сплавами. В отраслях «гражданского» производства композитов проявляются особенности, которые проектировщику, технологу, расчетчику и испытателю необходимо учитывать. В данной работе автор постарался обратить внимание на основные особенности в подходе к выбору объекта использования композитных материалов, особенно там, где возможно наиболее эффективное их использование.

Использование композитных материалов в ракетной, космической и авиационной промышленности никого не удивляют сегодня, поскольку основным преимуществом перед металлами и сплавами является снижение веса. А снижение веса «над землей» позволяет находиться там все дольше, перемещаться дальше и получать больше, - то, к чему человек всегда стремится.

Найти сейчас, например, лопасти не из карбона (углепластика) или пластика для дрона или беспилотника является затруднительным. Объясняется это тем, что нецелесообразно использовать металлические лопасти для аппаратов данной весовой категории. Но это обоснованное и вынужденное использование композитных материалов согласно расчетам на прочность с учетом массы. А что, если мы будем говорить не о привычных задачах на прочность, а о задачах, в которых композиты будут привлечены в роли накопителей энергии, - упругой энергии.

Уже более 50-ти лет назад композитные изделия стали интересны своими особыми свойствами спортсменам. В частности, на смену металлическим шестам в прыжках в высоту с шестом пришли шесты из стекловолокна, так как именно запасаемая упругая энергия деформации шеста и была той самой главной характеристикой, которая интересовала прыгунов.

Как известно из курса сопротивления материалов запасенная потенциальная энергия деформации балки при поперечном изгибе можно определить по следующей формуле:

$$V = \frac{k}{2} \int_0^l \frac{Q_y^2}{GF} dz + \frac{1}{2} \int_0^l \frac{M_x^2}{EI_x} dz$$

где первый интеграл представляет собой энергию сдвига, а второй интеграл – энергию чистого изгиба.

Для того, чтобы использовать композитные материалы в качестве накопителей упругой энергии деформации, следует обратить внимание на такие особенности как: изготовления, типа волокон, геометрии поперечного сечения, геометрии укладки волокон, крепления.

1) Особенности изготовления заключаются в том, что важным параметром для упругого элемента (УЭ далее), является процентное соотношение волокна и матрицы. Ведь известно, что матрица (или связующее вещество) не призвано нести основную нагрузку на растяжение, но может противостоять сдвигу. Поэтому корректно обусловленная задача с траекторией и прогибами в УЭ позволят нам сузить выбор не только технологии изготовления, но и приблизить нас к более простой вариационной задаче.

2) Особенности применения волокон следует учитывать, ведь в большинстве случаев в конструкциях, в которых применяют композитные материалы, волокна работают именно на растяжение, а для УЭ важен именно изгиб и сдвиг.

В рассмотрении лишь работы волокон ясно, что на растяжение они работают лучше всего на сжатие. Без матрицы им невозможно работать по причине потери устойчивости. И на изгиб они не пригодны без матрицы, так как будут подвергаться лишь самому изгибу; а вот при комбинации матрицы с волокном происходит «мультипликация» прочностных свойств на изгиб, поскольку волокна начинают работать на растяжение и сжатие внутри матрицы.

Именно поэтому стоит также обратить внимание на те радиусы кривизны, с которыми придется работать волокну внутри УЭ.

3) Особенность и влияние геометрии поперечного сечения на прогиб (а, следовательно, и упругую энергию деформации) известно из курса сопротивления материалов. Лишь хочется обратить внимание на два аспекта:

- при выборе сечения важно помнить об изгибно-крутильной потере устойчивости;
- при создании УЭ с максимально возможным запасом энергии (при одинаковом прогибе) необходимо достигать равнопрочности по координате. Проще всего рассмотреть изгиб балки, у которой вдоль длины сохраняется площадь поперечного сечения, которую называют констэра (constant area – постоянная площадь).

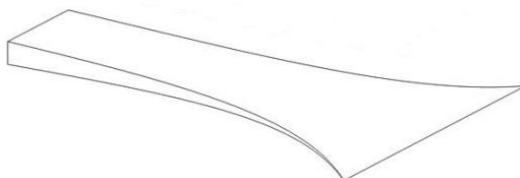


Рис.1. Констэра – балка с постоянной площадью поперечного сечения.

4) Геометрия укладки волокон также важна для УЭ, поскольку эффективнее всего не прибегать к механическим доработкам изделия после его изготовления, ввиду того, что целостность части волокон будет нарушена, а значит и не будет нести нагрузку. Лишь понимание геометрии укладки нам позволит выбрать не только подходящее волокно, но также и уложить его таким образом, чтобы минимизировать нарушение укладки.

Если посмотреть на природу и в качестве примера рассмотреть дерево, то можно четко наблюдать, как дерево грамотно подходит к вопросу укладки волокон в области сучка, на котором потом вырастут листья и плоды, которые в свою очередь будут являться причиной нагрузки на крепление сучка (ветровая, снеговая и прочие виды нагрузки).



Рис.2. Огибание сучка волокнами

5) Особенности крепления также не стоит упускать из виду. Композитные детали имеют ограничения в изготовлении как минимум по причине того, что волокна имеют определенный минимальный радиус скругления, после которого использование волокна будет нерациональным в данном изделии. Поэтому важно понимать каким образом будет осуществляться крепление УЭ к изделию, что опять же минимизировать механические доработки, которые, как уже было замечено, вносят отрицательный вклад в прочностные характеристики УЭ.

В данной работе обозначены основные и определяющие особенности, на которые стоит обратить внимание современному инженеру и специалисту по композиционным материалам.

Во многом нам стоит поучиться у природы, ведь композиты в природе существуют уже давно, - от начала ее создания Творцом.

Литература

1. A.N.Polilov, N.A.Tatus', I.S.Plitov. Estimating the Effect of Misorientation of Fibers on Stiffness and Strength of Profiled Composite Elements//ISSN 1052-6188, Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2013, Vol. 42, No. 5, pp. 390–397. © Allerton Press, Inc., 2013.
2. A.N.Polilov, A.V.Malakhov. Construction of trajectories of the fibers which bypass a hole and their comparison with the structure of wood in the vicinity of a knot//ISSN 1052-6188, Journal of Machinery Manufacture and Reliability. July 2013, Volume 42, Issue 4, pp 306-311. © Allerton Press, Inc., 2013.
3. Malakhov A., Polilov A. Design of joints of composite members with curvilinear reinforcement structure, proceedings of ECCM 16 (The 16th European Conference on Composite Materials) / Seville, Spain, 2014
4. Polilov A.N. Mechanisms of stress concentration reduction in fiber composites. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2014. Т. 55. № 1. С. 154-163.
5. Полилов А.Н., Татусь Н.А., Шабалин В.В. Особенности проектирования упругих элементов в виде профилированных композитных балок // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2011. – № 6. – С. 34-41.
6. Румачик М. М. Моделирование и исследование физико-механических свойств древесного композита // XLIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. – 2017. – С.67-68.

ВЛИЯНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА СВОЙСТВА ФУЛЛЕРАНОВ

Рысаева Л.Х., Баимова Ю.А.

ИПЦМ РАН

E-mail: lesya813rys@gmail.com

Изменения структуры и свойств алмазоподобных материалов в настоящее время представляют большой интерес, поскольку алмазоподобные углеродные фазы имеют широкий спектр коммерческих применений, как защитные покрытия с необычными механическими свойствами, применение в медицине и пр. В данной работе с помощью моделирования молекулярной динамики анализируется деформационное поведение устойчивых алмазоподобных фаз. Рассмотрены пять устойчивых структур (A3, A7, A8, A9 и B) на основе фуллереноподобных молекул. Структурные изменения при гидростатическом растяжении и сжатии исследуются для понимания механизмов деформации. Деформацию при гидростатическом напряжении можно разделить на три режима в зависимости от механизма деформации. Обнаружено, что алмазоподобные структуры могут быть гидростатически сжаты до плотностей алмаза, но большинство из них теряют кристаллический порядок и переходят в аморфное состояние. Тепловые флуктуации уменьшают критические значения деформации при гидростатическом напряжении, но практически не влияют на критическую деформацию сжатия.

Введение. В настоящее время актуальна проблема изучения свойств и многообразия углеродных наноструктур, а так же поиск новых углеродных материалов. Уже было доказано, что среди материалов на основе атома углерода можно найти структуры с уникальными физическими свойствами: аллотропы углерода, такие как графен, фуллерены и нанотрубки, наноленты; наноалмазы, 3D-графены, алмазоподобные углеродные фазы (УАФ). Алмазоподобные углеродные наноструктуры представляют собой довольно широкий диапазон материалов, которые могут использоваться в различных областях применения, например, для создания сверхпрочных защитных покрытий, биомедицине, и др. Некоторые из этих структур представляют аморфные углеродные пленки, которые включают водород и смесь sp^3 - и sp^2 -связей. Некоторые другие представляют собой жесткие структуры с единственным типом гибридизации - sp^3 . Такие структуры обладают уникальными свойствами, например низким трением, химической стабильностью, высокой твердостью близкой или даже превышающей прочность алмаза. Теоретический анализ показал, что некоторые из них являются частичными аусетиками, т.е у них наблюдается отрицательный коэффициент Пуассона [1, 2]. Для углеродных наноструктур факторами, определяющими его свойства, являются кристаллографическая размерность и число ближайших соседей для атома, поэтому исследование структурных особенностей имеет большое значение.

В настоящей работе рассматриваются стабильные алмазоподобные фазы на основе фуллереноподобных молекул (фуллераны), а их механические свойства и деформационное поведение исследуется методом молекулярной динамики.

Описание модели. Моделирование проводилось с использованием пакета моделирования LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator) с эмпирическим потенциалом межатомного взаимодействия AIREBO. Данный потенциал был успешно использован для исследования тепловых и механических свойств различных углеродных систем. Для создания необходимых структур была использована написанная авторами программа, а необходимые исходные данные координат атомов для построения структур были взяты из [3]. Первым шагом является релаксация структуры до глобального минимума энергии, что позволяет обнаружить устойчивые УАФ. Затем ячейка моделирования деформируется в гидростатическом режиме ($\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z = \epsilon$), где ϵ - параметр, монотонно увеличивающийся (или уменьшающийся) со скоростью деформации $0,005 \text{ пс}^{-1}$. Изменение скорости деформации в четыре и восемь раз меньше не влияет на результаты. При деформации определяются гидростатическое давление и другие параметры системы. Шаг моделирования составлял 0,2 фс. Процедура релаксации и растяжения/сжатия была проведена для всех устойчивых структур для оценки их механических свойств. Моделирование проводилось при температурах 1 К и 300 К, а температурный режим поддерживался с помощью термостата Носе-Хувера.

Структурные параметры и устойчивость этих систем были исследованы ранее в [4], где десять равновесных алмазоподобных фаз, на основе фуллереноподобных молекул были

найлены из *ab-initio* расчета и аналитического анализа. Анализ упругих констант (коэффициентов жесткости и податливости) показал, что условия устойчивости могут выполняться только для пяти из этих структур, устойчивых при внешних воздействиях [2]. Таким образом, только пять устойчивых кубических алмазоподобных фаз рассмотрены в настоящей работе: А3, А7, А8, А9 и В. Атомные структуры алмазоподобных фаз показаны на рисунке 1.

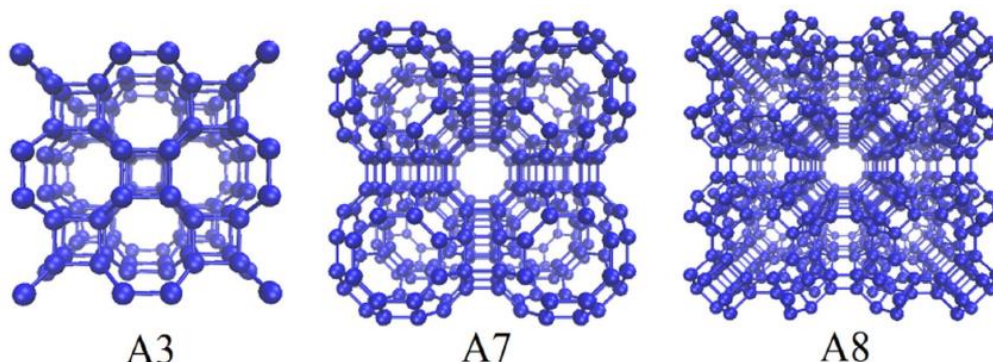


Рис.1. Пример исследуемых углеродных алмазоподобных фаз

Результаты. Показано что на кривых деформация-напряжение при гидростатическом растяжении могут быть выделены три участка, соответствующие разным видам деформации и изменению длин связи и валентных углов. Достаточно большие степени деформации, достижимые для УАФ, объясняются эффективными структурными перестройками, удлинением одной из ключевых связей. Вблизи точки критической деформации деформирование происходит за счет изменения валентных углов с возвратом к неравновесным значениям, после чего ресурс деформирования истощается и происходит разрыв связей. При гидростатическом сжатии происходит переход алмазоподобных фаз в аморфное состояние, что может быть охарактеризовано как видом самих кривых нагрузка-сжатие, так и функциями радиального распределения. Кривая гидростатической деформации показана на примере структуры А3 на рисунке 2, причем на каждом этапе деформирования показано изменение структуры в характерном единичном элементе.

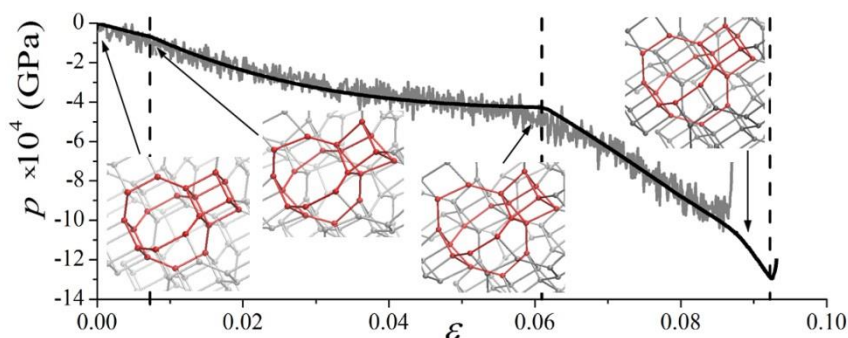


Рис. 2. Кривая деформация-напряжение для СА3 при гидростатическом растяжении

Как видно из рисунка 2, температура мало влияет на ход кривой, однако рассмотренная величина температуры довольно далека от температуры плавления алмаза, которая оценивается близкой к 3700-4000 К. Влияние температур выше комнатной требует дальнейших исследований. Как видно по изменению структуры, уже в первые моменты начала релаксации происходит изменение валентных углов и длин валентных связей, что является характерным поведением всех рассмотренных УАФ. Кривая деформации-напряжения структуры СА3 может быть разделена на три этапа: упругая деформация и два этапа неупругой деформации. В основном деформация на втором и третьем этапах обеспечивается изменением длин связей и валентных углов, причем на первом этапе углы от 90 ° изменяются до ~110 °, а на втором этапе возвращаются к исходной величине 90 °.

Выводы. Методом молекулярной динамики исследованы пять устойчивых УАФ

различной морфологии на основе фуллереноподобных молекул. Показано, что приложение значительного гидростатического давления приводит к аморфизации структуры как при нулевой так и при комнатной температурах. При гидростатическом растяжении происходит постепенное изменение длин валентных связей и валентных углов в структуре, а характер их изменения определяет механизмы деформирования на каждой стадии неупругой деформации.

Литература

1. Лисовенко Д.С., Баимова Ю.А., Рысаева Л.Х., Городцов В.А., Дмитриев С.В. Равновесные структуры из углеродных алмазоподобных кластеров и их упругие свойства // Физика твердого тела. 2017. Т. 59. № 4. С. 801-809.
2. Lisovenko D.S., Gorodtsov V.A., Baimova J.A., Rysaeva L.K., Dmitriev S.V., Rudskoy A.I. Equilibrium diamond-like carbon nanostructures with cubic anisotropy: elastic properties // Physica Status Solidi (B): Basic Solid State Physics. 2016. Т. 253. № 7. С. 1295-1302.
3. Грешняков В.А., Беленков Е.А., Березин В.М. Кристаллическая структура и свойства углеродных алмазоподобных фаз. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. 2012. 150 с.
4. Belenkov E. A., Greshnyakov V. A. Classification of structural modifications of carbon. // Phys. Solid State. 2013. Т. 57. С. 2331.

СТРУКТУРНЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХРОМУГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ ХРОМ-НАНОАЛМАЗНЫХ МИШЕНЕЙ

Рэйляну М.Д.¹, Авдюхина В.М.¹, Хрущов М.М.²

¹ МГУ, Физический факультет

² ИМАШ РАН

E-mail: maks.200606@gmail.com

Исследована структура покрытий, полученных методом магнетронного распыления составных и спеченных мишеней. Показано, что структура покрытий носит композиционный характер, зависящий от взаимодействия компонент мишени друг с другом и с активными газами, входящими в состав рабочей атмосферы.

При изготовлении образцов для исследований были использованы два типа мишеней: массивные хромовые мишени с отверстиями, в которые помещался наномалмазный порошок (составные мишени), и мишени, полученные методами порошковой металлургии. Также изучались покрытия, изготовленные в сходных условиях распылением мишеней из чистого хрома.

Данные о химическом и фазовом (путем рентгендифракционного исследования) составах покрытий, изученных в данной работе, приведены в таблице, а на рисунке представлены данные по нанотвердости и результатах трибологических испытаний образцов покрытий.

№ п.п.	Тип мишени	Условия напыления	Химический состав ат. % ($\pm 0,1$ ат.%)			Фазовый состав, ± 6 об. %
			Cr	C	N	
1	Cr	Ar	90,7	9,3	–	Cr
2	Cr+ND (составная)	Ar	91,3	8,7	–	Cr
3	Cr	Ar + N ₂ (5:1)	78,2	7,5	12,2	Cr + Cr ₂ N (64%, 36%)
4	Cr+ND (составная)	Ar + N ₂ (5:1)	75,9	7,6	14,3	Cr + Cr ₂ N (37%, 63%)
5	Cr+ND (составная)	Ar + N ₂ (7:1)	72,5	16,4	8,1	Cr + Cr ₂ N _{0,4} C _{0,6} (46%, 54%)
6	Cr+ND (составная)	Ar + N ₂ (7:1) U _{см} = – 60 В	78,6	8	11,6	Cr + Cr ₂ N (75%, 25%)
7	Cr+ND (спеченная)	Ar	58,5	40,6	–	Cr + Cr ₇ C ₃ (60%, 40%)

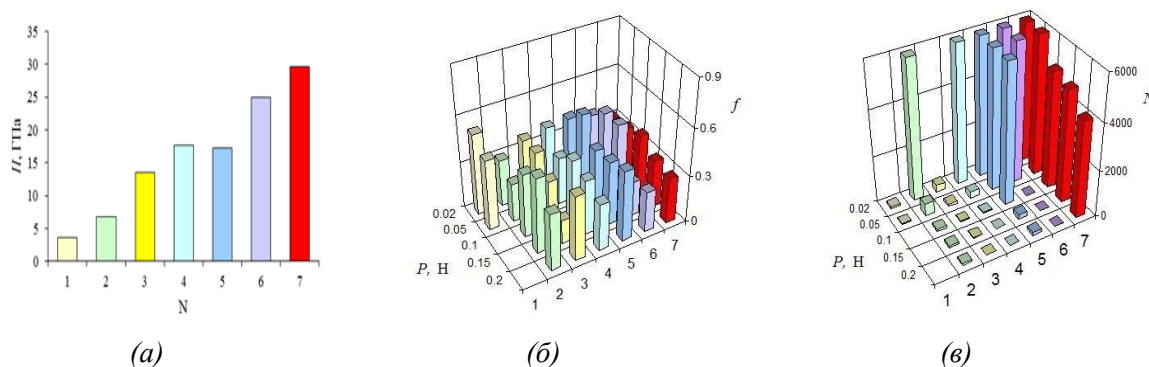


Рис.1. Твердость покрытий (а) и зависимость трибологических свойств от нагрузки P : (б) – коэффициент трения f ; (в) – число циклов до разрушения покрытий N .

Было установлено, что в образцах 1–4 содержание углерода составило < 10 ат.%. В образцах 1 и 2, нанесенных в отсутствие азота, присутствовал только хром. При напылении в присутствии азота (образцы 3 и 4), содержание последнего было на уровне $\sim 12\div 14$ ат.%, и помимо хрома в них был обнаружен также нитрид хрома Cr_2N . Трибологические испытания показали, что эти покрытия даже при малых нагрузках $P < 0,1$ Н разрушались практически сразу. В то же время у покрытий №№ 5–6 трибологические свойства оказались выше. В частности, при $P = 0,1$ Н они оставались вполне работоспособны, а значительные колебания величины коэффициента трения f , связанные с началом фрикционно-усталостного разрушения, наблюдались при $P = 0,15$ Н, что, по-видимому, было обусловлено тем, что при их нанесении в распылительной атмосфере помимо аргона дополнительно присутствовал азот.

Покрытие №5 с 15 ат.% углерода и 10 ат.% азота содержало карбонитридную фазу $\text{Cr}_2\text{N}_{0,4}\text{C}_{0,6}$. В покрытии 6 с содержанием азота таким же, как в образцах 3 и 4, трибологические свойства оказались выше, что, видимо, можно связать с дополнительной ионной бомбардировкой поверхности при потенциале смещения $U_{\text{см}} = -60$ В, ведущей к формированию более плотной структуры и пониженной пористости.

Также было установлено, что большинство покрытий, полученных с использованием составных мишеней (№№ 1–4), имеет нанотвердость, ≤ 17 ГПа. В частности, чисто хромовые покрытия 1 и 2 обладают нанотвердостью ~ 4 и 7 ГПа, соответственно. Таким образом, низким микромеханическим характеристикам покрытий можно поставить в соответствие их низкую работоспособность при трении. В то же время, работоспособность покрытий 6 оказалась выше, чем у прочих образцов, полученных с использованием составных мишеней. Одновременно с этим, покрытия 6 имели нанотвердость ~ 25 ГПа, что позволяет сделать вывод, что имеется связь между высокими микромеханическими свойствами хром-наноалмазных покрытий и их работоспособностью при трении в условиях тяжело нагруженного контакта. В частности, можно предположить, что покрытия с высокими показателями работоспособности должны иметь твердость, близкую 30 ГПа или выше.

Поскольку покрытия, полученные распылением составных хром-наноалмазных мишеней, содержат относительно небольшое количество углерода (не более 17 ат. %, и имеют низкие трибологические свойства) была поставлена задача: получить покрытия с большим содержанием в них углерода, для чего использовали мишени, приготовленные методами порошковой металлургии. Были изготовлены мишени двух типов – компактированные методом горячего прессования (тип I) и спеченные (тип II).

Мишень I типа имела достаточно неоднородную рыхлую структуру с сильной пористостью. Она содержала относительно мелкие ограненные гранулы, размером $\sim 5\div 20$ мкм, среди которых были хаотически распределены отдельные достаточно крупные образования неправильной формы. Размер отдельных таких образований доходил до $\sim 50\div 70$ мкм, а содержание в них углерода было близко к 100-процентному. В мелких же, частично ограненных, гранулах наблюдали значительную концентрацию хрома, содержание которого,

по данным МРСА, колебалось в достаточно широких пределах – от 80 до 40 ат. %. Она также имела низкую механическую прочность и легко разрушалась (раскрашивалась), и использовать их при магнетронном напылении в качестве источника распыляемых материалов оказалось невозможно.

Компактированные мишени II типа, полученные спеканием хромового и наноалмазного порошков, оказались более удачными: они были менее пористыми, с характерным размером отдельных частиц в них менее 5 мкм, и механически более прочными. Они имели более равномерный состав, что позволило в дальнейшем применить их в качестве источника распыляемого материала. Мишень такого типа содержит хром, углерод и кислород (59, 23,5 и 15,5 ат. %, соответственно). При распылении ионами аргона хром из нее практически полностью переносится в образующееся покрытие, а кислород за счет эффектов преимущественного распыления удаляется – в полученном покрытии содержится ~40 ат. % углерода. Поскольку содержание углерода в таком покрытии (обр. 8) сопоставимо с наблюдаемым в легированных хромом алмазоподобных покрытиях, полученных в смеси аргона и ацетилена, можно предположить, что оно обладает высокими функциональными характеристиками.

Данные трибологических испытаний показали, что хотя покрытие 8 и обладает $f \sim 0,3$, оно оказалось работоспособным во всем диапазоне нагрузок ($N > 4000$ циклов при нагрузке $P=(0,1 \div 0,2)$ Н), что значительно превышает показатели обр. 1–6. Это может служить подтверждением перспективности использования магнетронных мишеней, полученных спеканием, для нанесения хром-наноалмазных покрытий с высокими трибологическими свойствами, обладающих композитной структурой.

Можно заключить, что структура покрытий, наносимых магнетронным распылением составных и полученных методами порошковой металлургии мишеней, носит композиционный характер и представлена фазами, образованными в результате взаимодействия компонентов мишени друг с другом и с активными газами, входящими в состав рабочей атмосферы. Исследование методом спектроскопии комбинационного рассеяния показало, что углерод, в покрытиях присутствует в виде отдельных сферических частиц микронного размера и их агломератов. Наблюдаемые при этом структуры являются алмазоподобными со степенью графитизации, значительно изменяющейся от частицы к частице.

Наиболее высокими триботехническими характеристиками и работоспособностью обладают покрытия, осажденные магнетронным распылением мишеней, полученных спеканием хромового и наноалмазного порошков.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-08-05264).

ОЦЕНКА ЖИВУЧЕСТИ СТАЛЬНОГО СЕТЧАТОГО КУПОЛА ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИЯХ

Самохвалов И.А.^{1,3}

Научный руководитель – Ерофеев В.И.^{1,2}

¹ННГУ им. Н. И. Лобачевского, ²ИПМ РАН, ³ННГАСУ

E-mail: vantys1994@yandex.ru

В статье представлены результаты исследования вопросов живучести стального сетчатого купола в статической и динамической постановке. Дана оценка уровня живучести купола с помощью индекса живучести.

Одним из методов повышения безопасности эксплуатации объекта может быть обеспечение последнего таким качеством, как живучесть. Свойство живучести конструкции проявляется только в результате аварийного воздействия, которое приводит к выходу из строя какого-либо элемента конструкции. Живучесть позволяет системе сохраняться как целому в экстремальных для нее условиях.

Живучесть (англ. *robustness*) – способность поврежденной системы адаптироваться к новым, изменившимся и, как правило, непредвиденным ситуациям, противостоять вредным воздействиям, выполняя при этом полностью или частично свою целевую функцию, за счет соответствующего изменения структуры и поведения системы [1]. При том, «под живучестью» понимают свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов. В работе [1] поведение конструкции в поврежденном состоянии предлагается рассматривать в рамках 3-го предельного состояния.

В настоящее время широко не применяется прогнозирование аварийных ситуаций (теракты, дефекты конструкций, аварии, вызванные тяжёлым режимом работы конструкций и др.), в результате которых происходит разрушение отдельных элементов конструкции.

Актуальность данной работы заключается в том, что в настоящее время проблема оценки живучести конструкций, в том числе и купольных, а так же их способности «противостоять» прогрессирующему обрушению, далека от их эффективного решения.

Целью работы является численное исследование работы стального купола в статической и динамической постановке в условиях отказа отдельных несущих элементов системы в результате аварийного воздействия. Такой расчет как раз оценивает свойства живучести конструкции. Если при отказе отдельных несущих элементов конструкция обладает способностью перераспределения усилий на соседние элементы, то можно считать, что она обладает потенциальной живучестью [2].

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: рассмотрено несколько вариантов обрушения несущих элементов в разных областях стального купола в статической постановке и выявлены наиболее опасные зоны разрушения с точки зрения живучести конструкции; выполнен модальный анализ конструкции и выявлены наиболее неблагоприятные частоты и формы собственных колебаний; проведена оценка влияния времени действия импульсной нагрузки, необходимой для моделирования динамического эффекта при удалении части покрытия; проведен численный эксперимент по расчету стального купола на живучесть в динамической постановке; сделана оценка уровня живучести купола с помощью индекса живучести.

Объектом исследования является стальной звездчатый купол диаметром 48 метров и стрелой подъема - 16 метров. Был произведен статический расчет данного по действующим нормам для IV снегового района, выполнен подбор сечений элементов по первому и второму предельным состояниям. Расчёт выполнялся методом конечных элементов, с применением пакета прикладных программ «SCAD Office». В качестве модели покрытия принята пространственная КЭ-модель, учитывающая геометрические параметры и характер распределения нагрузок: собственный вес, вес покрытия, 3 вида снеговой нагрузки (рис.1).

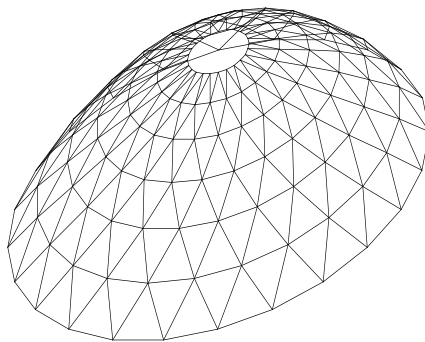


Рис. 1. Конечно-элементная модель сетчатого купола

Для исследования вопроса живучести в статической постановке из модели поочередно удалялись различные узлы с примыкающими к ним 6-ю несущими элементами покрытия, якобы вышедшими из строя в результате аварийного воздействия, и оценивалась способность системы воспринимать те же нагрузки.

В результате статического расчёта купольного покрытия с удалёнными элементами, было получено, что в каждом из 8 вариантов разрушения внутренние усилия перераспределяются на стержни 1-го нижнего яруса и они становятся наиболее загруженными. Усилия в кольцевых элементах данного яруса возрастают на 72%, а в меридиональных на 21%, независимо от расположения удалённых элементов [3]. Наиболее опасным из всех вариантов разрушения является выход из строя элемента нижнего опорного кольца. Это приводит к увеличению усилий в соседних раскосах в 2 раза. Максимальные перемещения, которые были выше допустимых, появлялись только в одном случае отказа элементов - элементов верхнего яруса купола.

Важнейшими динамическими характеристиками конструкции являются частоты и формы собственных колебаний. Для их оценки был проведен модальный анализ конструкции с преобразованием статических нагрузок в массы. Другими словами модальный анализ конструкции проводился с целью определения, как удаление тех или иных узлов влияет на формы и частоты собственных колебаний. В результате проведенных исследований были получены величины отклонений собственных частот колебаний при различных вариантах разрушения элементов от частот неповрежденной конструкции. Было выявлено, что по величине существенно изменились только собственные частоты третьей и четвертой формы. При одном случае разрушения изменилась пятая частота. Были определены собственные частоты колебаний, которые получили наибольшие отклонения, что дало возможность использовать их в дальнейших динамических расчётах [4].

Методика расчета конструкции на живучесть с помощью импульсных однократных нагрузок представлена в работе [2] и имеет следующую последовательность:

- Удаление группы элементов (обрушившихся);
- Добавление вместо выбывших элементов их внутренних усилий с обратным знаком, действующих в узлы, соседние с удаленным элементом;
- Добавление в узлы соседние с удаленным элементом нагрузок от собственного веса обрушившихся конструкций с учетом коэффициента перегрузки K_g ;
- Добавление в те же узлы динамического нагружения в виде однократного импульса, продолжительность действия которого принимается $1/20$ от периода той формы колебаний, которая является наиболее неблагоприятной по результатам модального анализа (так, в данной работе использовались периоды первой, третьей и пятой форм колебаний). Форма воздействия импульсной нагрузки принималась линейно-убывающей;
- Расчет конструкции, перерасчет ее в постпроцессоре «Проверка металлопроката» по критическому фактору K_{max} (расчет по первому и второму предельному состоянию);
- Анализ.

В данной работе рассматривалось несколько вариантов удаления узлов сетчатого купола при несимметричном нагружении снеговой нагрузкой.

Поскольку живучесть той или иной конструктивной формы обеспечивается за счёт перераспределения усилий между элементами конструкции и зависит от её связности, то

общая закономерность при выборе конструктивной формы заключается в предпочтении многосвязных конструктивных систем. Уровень живучести конструкции, после повреждения n-го уровня или этапа, предлагается оценивать индексом или коэффициентом

живучести I_{rob}^n [1]:
$$I_{rob}^n = \frac{N_{вс.элемен.} - N_{выбыв.}}{N_{вс.элемен.}} \cdot 100\%$$
, где: $N_{вс.элемен.}$ – общее число элементов

конструкции, $N_{выбыв.}$ – число элементов, вышедших из строя.

В работе определен индекс живучести при разрушении узлов сетки в разных зонах купола и результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Значение индекса живучести

Вариант разрушения	Разрушение части сетчатого покрытия со стороны, нагруженной снеговой нагрузкой (при несимметричном нагружении)		Разрушение части сетчатого покрытия со стороны, незагруженной снеговой нагрузкой (при несимметричном нагружении)	
	Количество разрушенных элементов	Коэффициент живучести, %	Количество разрушенных элементов	Коэффициент живучести, %
Зона купола с удаленным элементом				
Нижний ярус	66	84,2	39	91,3
Средний ярус	45	90	25	94,4
Верхний ярус	34	92,4	11	97,5
Сред. индекс		88,86		94,40

Основные выводы:

1. Конструкция сетчатого купольного покрытия обладает высокой живучестью, так как при выключении отдельных узлов сетки, обрушения не происходит.

2. Опасная зона, с точки зрения живучести, находится возле опорного кольца. Удаление одного отдельного элемента в ней приводит к наибольшему проценту разрушения конструкции, индекс живучести здесь составляет 84,2%

3. В результате работы было получено, что значительное увеличение зоны разрушения происходит, когда время действия импульса лежит в интервале от 0.2 до 0.6 сек, дальнейшее увеличение времени действия импульса приводит лишь к незначительным изменениям;

4. Средний индекс живучести конструкции возрастает при разрушении элементов, расположенных дальше от опорного кольца и ближе к внутреннему кольцу, и изменяется от 87,7% до 94,9%.

5. Индекс живучести при разрушении части сетчатого покрытия со стороны, незагруженной снеговой нагрузкой (при несимметричном нагружении), на 4-7% выше, чем со стороны, нагруженной снегом.

Литература

1. Кудишин Ю.И., Дробот Д.Ю. Методика расчета строительных конструкций на единичную живучесть // Сб. науч. тр. Международного симпозиума «Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство)». – Брест: БРГТУ. – 2009. – С. 132 - 141.
2. Трянина Н.Ю., Тестоедов П.С. Исследование вопроса живучести стальных сетчатых покрытий. //Приволжский научный журнал, №1(33). -2015.- С. 9-15.
3. Самохвалов И.А., Трянина Н.Ю. Статический анализ купольного сетчатого покрытия при разрушении отдельных его несущих элементов. Труды научного конгресса 14-го Российского архитектурно-строительного форума. 2016 г. – С.80-84.
4. Самохвалов И.А., Трянина Н.Ю. Модальный анализ купольного сетчатого покрытия при потере несущей способности отдельных его узлов. Труды научного конгресса 14-го Российского архитектурно-строительного форума. 2016 г. – С.84-87.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ЗАХОДНОЙ ЧАСТИ МАТРИЦЫ НА КИНЕМАТИКУ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ФОРМОИЗМЕНЕНИИ ПЛОСКОЙ ЗАГОТОВКИ

Самсонов Н. А.

Научный руководитель – доцент, к.т.н. Платонов В.И.
ТулГУ, Механико-технологический факультет, Кафедра МПФ
E-mail: SamsonovNA9@yandex.ru

Современное машиностроительное производство Тульских оборонных предприятий испытывает потребность в новых инновационных решениях и идеях, способных улучшить производительность труда, а так же получать детали ответственного назначения способные соответствовать необходимым критериям качества. Сложности, связанные с исследованиями, внедрениями расчетов, а так же изготовлением необходимого оборудования для анизотропных материалов на предприятиях не позволяют применить технологии, улучшающие характеристики изделий для данной среды использования.

Игнорирования исследований связанных с вытяжкой анизотропных материалов, способствует фестонообразованию, которое в свою очередь приводит к уменьшению коэффициента использования металла. Необходимость добавления второй операции (обрезки) является малоэффективным, трудозатратным действием технологического процесса. Осесимметричные цилиндрические детали, находят свое применение в оборонной промышленности, а именно изготовление различных оболочек ответственного назначения, способных выдерживать нагрузки при старте и полете ракеты. Основной технологией получения таких изделий является вытяжка. Для исследования нами была принята операция вытяжки с цилиндрической и конической матрицей, не отвечающей современным параметрам изготовления деталей из анизотропных материалов, ввиду больших затрат на необходимость введения использования второй операции (обрезки). Изучение геометрии матриц с профильной радиальной, конусной заходной поверхностью приведет к исключению фестонообразования при вытяжке.

Влияние анизотропных свойств материала на течение металла обуславливается скоростью перемещения края заготовки в радиальном направлении при изотермической вытяжке. С уменьшением показателя коэффициента анизотропии скорость перемещения края заготовки будет расти, и противоположно с увеличением коэффициента анизотропии скорость края заготовки уменьшается. Из-за использования стандартных цилиндрических и конических матриц процесс фестонообразования неизбежно приведет к ухудшению качества получаемой детали и увеличению себестоимости технологического процесса получения данного вида деталей в целом. Невозможность влиять на процесс течения металла компенсируется возможностью изменять расстояние преодолеваемое металлом до контакта с основным цилиндрическим пояском матрицы и способствует равномерному течению металла по всему диаметру, вследствие чего процесс фестонообразования минимизируется. Использование таких матриц, дает возможность экономии не только на качестве изготавливаемой детали, но и на выбор прокатного листа в целом.

Проведенные нами исследования поведения перемещения края заготовки при ее формоизменении с использованием матриц с профильной заходной поверхностью, позволят добиться увеличения коэффициента использования металла на 15-20% в отличии от обычных матриц. Проведены исследования процесса вытяжки в программном комплексе Qform 3D, получены рекомендации по оптимальным технологическим конфигурациям, геометрии и форм штамповой оснастки. Получены основные зависимости течения анизотропных материалов. На основании этих зависимостей были предложены рекомендации по модернизации технологий изготовления анизотропных материалов с помощью изотермического деформирования.

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ИЗГИБ ПЛАСТИНКИ ИЗ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ С УЧЕТОМ РАЗНОСОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ЭТОГО МАТЕРИАЛА. МАРТЕНСИТНАЯ НЕУПРУГОСТЬ

Сафронов П. А.

Научный руководитель – профессор, д.ф.-м.н. Мовчан А. А.

МАИ, Институт №6, Кафедра 602

E-mail: www-midnight-express@yandex.ru

Сплавы с памятью формы (СПФ) являются одними из наиболее перспективных конструкционных материалов благодаря своим уникальным термомеханическим свойствам, наиболее известные из которых: накопление значительных неупругих деформаций без разрушения, восстановление первоначальной формы или инициация значительных реактивных усилий в заневоленном состоянии. Однако, широкому применению данных материалов препятствует отсутствие решения соответствующих краевых задач.

В предлагаемой работе представлены результаты численного моделирования поведения прямоугольной пластинки постоянной толщины из СПФ с учетом разносопротивляемости этого материала при чистом и консольном цилиндрическом изгибе. Рассматривается явление мартенситной неупругости на основе современной модели нелинейного поведения СПФ при фазовых и структурных превращениях [1,2], способной качественно и количественно верно описывать рассматриваемый процесс.

Не секрет, что при изгибе элемента конструкции, одна часть поперечного сечения этого элемента испытывает напряжения растяжения, а другая часть – напряжения сжатия. При испытаниях образцов из СПФ на растяжение и сжатие в режиме мартенситной неупругости установлено сильное различие кривых деформирования [3]. Поэтому, при решении класса краевых задач, посвященных изгибу элементов из СПФ, необходимо учитывать свойство разносопротивляемости.

Решение задачи о цилиндрическом изгибе пластинки из СПФ выполнено в рамках классических гипотез Бернулли-Эйлера. Принимается гипотеза о плоском деформированном состоянии в отношении компоненты тензора полных деформаций в направлении ширины пластины. Рассматриваются активные процессы пропорционального нагружения, при которых девиатор напряжений изменяется пропорционально нормальным продольным напряжениям в пластине.

Для задачи о мартенситной неупругости установлено, что свойство разносопротивляемости СПФ в значительной степени влияет на положение нейтральной плоскости пластины, положение которой заранее неизвестно и определяется в ходе численного решения полуобратным методом системы определяющих соотношений. Помимо этого установлено, что для малых значений изгибающего момента положение нейтральной плоскости определяется отношением упругих констант СПФ или разномодульностью, в то время как для средних и больших значений изгибающего момента положение нейтральной плоскости в значительной степени зависит от разницы в значениях параметров нелинейного деформирования материала при растяжении и сжатии, или от разносопротивляемости.

Распределение нормальных продольных напряжений по сечению пластины имеет сильно нелинейный характер. Для продольных нормальных деформаций установлено, что упругая составляющая этих деформаций превосходит структурную составляющую в области малых значений изгибающего момента. Однако, для больших значений изгибающего момента картина ожидаемо становится прямо противоположной и уже структурные деформации в значительной степени превосходят упругие. При этом установлен некий порог значений изгибающего момента, больше которых эпюра неупругих деформаций испытывает состояние насыщения, тем самым возобновляется интенсивный рост упругих деформаций в поперечном сечении пластины.

Для задач о консольном цилиндрическом изгибе пластины из СПФ установлено, что прогиб аналогичной балки на четверть превышает прогиб пластины [4]. Так же установлено 20-ти процентное отличие в податливости пластинки при решении задачи о цилиндрическом изгибе с учетом и без учета свойства разносопротивляемости СПФ.

Литература

1. Мовчан А.А., Мовчан И.А., Сильченко Л.Г. Микромеханическая модель нелинейного деформирования сплавов с памятью формы при фазовых и структурных превращениях. Изв. РАН МТТ, 2010. №3, С.118-130.
2. Мишустин И.В., Мовчан А.А. Аналог теории пластического течения для описания деформации мартенситной неупругости в сплавах с памятью формы. Изв. РАН. МТТ, 2015. №2, С.78–95.
3. Yong Liu, Z. Xie, J. Van Humbeeck And L. Delaey. Asymmetry of stress-strain curves under tension and compression for NiTi shape memory alloys. Acta mater, 1998. Vol 46, №12, P.4325–4338.
4. Сафронов П.А. Решение задач о мартенситной неупругости и прямом фазовом превращении в балке из сплава с памятью формы с учетом упругих деформаций и разнсопротивляемости этих сплавов. МКМК, 2017. №1, С.69-89.

ВОЛНОВОЙ ТЕПЛОПЕРЕНОС В АНИЗОТРОПНОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ В УСЛОВИЯХ ВОЛНОВОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ

Селиванова О. С.

Научный руководитель – доцент, д.ф.-м.н. Колесник С. А.
МАИ, Факультет №8, Кафедра вычислительной математики и программирование
E-mail: selivanovaolga93@gmail.com

При высоких скоростях нагрева (сотни градусов в секунду) в окрестности пространственно-временных границ (границы тела, начальное значение времени) возникает неравновесное состояние, а именно тепловой поток отстает от градиента температур, то есть тепловой поток не пропорционален градиенту температур (не выполняется классический закон Фурье, в соответствии с которым возникает парадокс бесконечной скорости распространения теплового потока) [1]. Такое отставание характеризует конечную скорость распространения теплового потока, то есть волновое распространение теплоты с возникновением фронтов разрыва температурного поля, теплового потока и второй производной распределения температур по пространственным переменным. Для учета волновых процессов теплопроводности (локального неравновесия) используется закон Каттанео-Вернотта-Лыкова [2], в соответствии с которым к градиентному слагаемому добавляется слагаемое, пропорциональное скорости изменения теплового потока с коэффициентом пропорциональности, равным времени релаксации. Использование этого закона приводит к волновому уравнению теплопроводности.

В анизотропных средах волновой теплоперенос описывается волновым уравнением теплопроводности, содержащим смешанные производные. Для процессов, описываемых такими уравнениями, тепловые потоки в разных направлениях имеют различные скорости. Моделирование теплопереноса в анизотропных средах на основе новых аналитических решений рассматривалось в работах [3-9].

В данной работе исследуется локально-неравновесное тепловое состояние в условиях волнового теплопереноса в окрестности пространственно-временных границ анизотропного полупространства под действием точечного источника теплоты, зависящего от времени, на основе нового аналитического решения. Локальное неравновесие вызывается отставанием по времени теплового потока от градиента температуры на величину времени релаксации, отчетливо наблюдаемого в окрестности границ при малых временах, соизмеримых со временем релаксации. Показано начальное формирование нестационарного температурного поля, которое как по количественным, так и по качественным характеристикам существенно отличается от случаев отсутствия времени релаксации. В частности, на границах подвижных фронтов температурное поле претерпевает разрывы непрерывности первого рода, характерные для волнового теплопереноса. Амплитуды этих разрывов со временем стремятся к нулю, однако в любом случае вторые производные температурного профиля по пространственным переменным не являются непрерывными. Анализируются новые численные результаты. Работа актуальна в быстро протекающих процессах релятивистской механики.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ: №18-01-00446А, и Гранта Президента РФ: МД-1250.2018.8.

Литература

1. Соболев С.Л. Процессы переноса и бегущие волны в локально-неравновесных системах // Успехи физических наук. 1991. Т. 161. № 3. С. 5–15.
2. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н. Математическое моделирование термомеханики. М.: Физматлит, 2002. 320с.
3. Формалев В.Ф., Колесник С.А. Аналитическое исследование теплового состояния анизотропной пластины при наличии теплообмена на свободных границах // Математическое моделирование. 2003. Т.15, №6. С.107-110.

4. Формалев В.Ф., Колесник С.А., Чипашвили А.А. Аналитическое исследование теплопереноса при плёночном охлаждении тел // Теплофизика высоких температур. 2006. Т.44, №1. С.107-112.
5. Формалев В.Ф., Колесник С.А. Сопряженный теплоперенос между пристенными газодинамическими течениями и анизотропными телами // Теплофизика высоких температур. 2007. Т.45, №1. С.85-93.
6. Формалев В.Ф., Колесник С.А. Аналитическое исследование теплопереноса в анизотропной полосе при задании тепловых потоков на границах //Инженерно-физический журнал. 2016. Т.89, №4. С.973-982.
7. Формалев В.Ф., Колесник С.А. Об обратных коэффициентных задачах теплопроводности по восстановлению нелинейных компонентов тензора теплопроводности анизотропных тел //Инженерно-физический журнал. 2017. Т.90, №6. С.1371-1379.
8. Формалев В.Ф., Колесник С.А. Об обратных граничных задачах теплопроводности по восстановлению тепловых потоков к анизотропным телам с нелинейными характеристиками теплопереноса // Теплофизика высоких температур. 2017. Т.55, №4. С.564-569.
9. Формалев В.Ф., Колесник С.А., Селин И.А. О сопряженном теплообмене при аэродинамическом нагреве анизотропных тел с высокой степенью анизотропии // Тепловые процессы в технике. 2016. Т.8, №9. С.388-394.

УПРОЧНЕНИЕ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ МОДИФИЦИРОВАННЫМ НАНОДИСПЕРСНЫМ ШУНГИТОМ

Семенов П.Е., Корнев Ю.В., Хазова В.А.

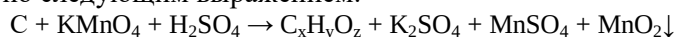
ИПРИМ РАН

E-mail: pavelsemenov401@gmail.com; yurikornev13@gmail.com

В настоящей работе исследуется возможность получения упрочняющих наполнителей на основе компонентов природного происхождения. Рассматриваются возможности окисления поверхности нанодисперсного минерала шунгит, а также исследование физико-механических свойств эластомерных композитов, наполненных окисленным нанодисперсным шунгитом.

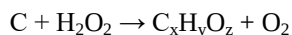
Введение. Сегодня эластомерные композиты являются одними из перспективных конструкционных материалов. Они обладают высокой прочностью, повышенной износостойкостью. Основной вклад, определяющий механические свойства эластомерных композитов, вносят упрочняющие наполнители. В нашей работе, в качестве наполнителя, предлагается применять нанодисперсный шунгит. Шунгит состоит из аморфного диоксида кремния (примерно 60%), углерода (примерно 25-35 %) и, в количестве около 1%, имеет примеси FeS, Al₂O₃, ZnO, FeO и др. В виду своего состава и оптимизации размера частиц, нанодисперсный шунгит подходит в качестве упрочняющего наполнителя в эластомерные композиты.

Методы. В предыдущей работе, в качестве модификации, применялось окисление микродисперсного шунгита перманганатом калия [1]. В данном случае реакция, проведенная с наноразмерным шунгитовым углеродом (образец НШ-1), реализована также, как и с микродисперсным шунгитом, однако протекает интенсивнее. Это может быть связано с увеличенной площадью удельной поверхности. А также, окисленный шунгит отличается характерным бурым оттенком. Здесь имеет место адсорбция окисленным шунгитом диоксида марганца, полученного в ходе протекания реакции. Общее уравнение реакции может быть представлено следующим выражением:



В качестве другого окислителя был взят пероксид водорода, причем концентрации порядка 30% масс. Окисление проводилось в двух различных средах суспензии: в нейтральной среде (образец НШ-2), в дистиллированной воде, и в кислотной среде (образец НШ-3), в 9%-ом растворе уксусной кислоты. Применение разных сред обусловлено тем, что в разных средах пероксид водорода обладает различной активностью.

Измельченный шунгит помещался в дистиллированную воду или раствор уксусной кислоты, и готовилась суспензия довольно высокой концентрации. Далее к полученной суспензии приливали пероксид водорода и перемешивали. Затем полученную суспензию отфильтровывали, промывали дистиллированной водой и высушивали в эксикаторе над прокаленным хлоридом кальция. Общее уравнение реакции можно представить следующим выражением:



Методика окисления шунгитового углерода пергидролью в целом зарекомендовала себя лучше, нежели чем методика с перманганатом калия, т.к. среда менее агрессивна, что связано с меньшими ресурсными затратами, например требуется меньше усилий для очистки. Другим аспектом данной методики является экологичность – отказ от применения серной кислоты и перманганата калия намного лучше может повлиять на экологическую обстановку и значительно снижает затраты экологической статьи бюджета на возможное будущее производство.

Для исследования влияния окисления шунгитового углерода на механические свойства эластомерных материалов были изготовлены резиновые смеси, наполненные нанодисперсным окисленным шунгитом на основе каучука СКС-30АРК.

Для полученных смесей была определена кинетика отверждения. Из полученных данных видно, что смеси Ш-951, Ш-952, наполненные окисленным наноразмерным шунгитом обработанным перекисью водорода, имеют минимальный индукционный период (Ш-951 – 5 мин, Ш-952 – 4 мин) и высокую скорость вулканизации. Образец Ш-950 наполнен шунгитом

образца НШ-1. Вулканизация смеси имеет совершенно другой характер. Она протекает довольно плавно и практически не имеет как такового индукционного периода, более того вулканизация протекает крайне медленно. Вулканизационные характеристики смесей (кинетика отверждения) представлены в табл. 1.

Табл. 1

Вулканизационные характеристики резиновых смесей				
№ образца/свойства	Ш-940 (ненап.)	Ш-950 (НШ-1)	Ш-951 (НШ-2)	Ш-952 (НШ-3)
$M_{\min}$, [дН*м]	5	8	7	7
$M_{\max}$, [дН*м]	36	31	58	58
t_{ind} , [мин]	12	3	4	4
t_{90} , [мин]	20	35	12	12
S , [%/мин]	12,5	10	7,7	12,5

$M_{\min}$ – минимальный крутящий момент; t_s – время начала вулканизации; $M_{\max}$ – максимальный крутящий момент; t_{ind} – индукционный период вулканизации; t_{90} оптимальное время вулканизации; S – Скорость вулканизации

В ходе работы также была получена зависимость динамического модуля упругости от амплитуды деформации при частоте 10 Гц и температуре 60 °С (рис. 1) Данное исследование проведено для оценки эффекта Пейна [2], который характеризует взаимодействия частиц наполнителя, а также его изменения в зависимости от фактора измельчения наполнителя.

Наиболее низким значением модуля упругости обладает ненаполненный образец, а также с наполнителем НШ-1, обработанным наиболее жесткими окислителями. Сопоставляя эти данные с кинетическими кривыми отверждения, можно сделать вывод, что функциональные группы поверхности наполнителя взаимодействуют с вулканизационной группой композита, что замедляет процесс вулканизации и взаимодействие частиц наполнителя друг с другом. Наибольший модуль наблюдается у образца НШ-3, окисление которого проводилось пероксидом водорода в нейтральной среде.

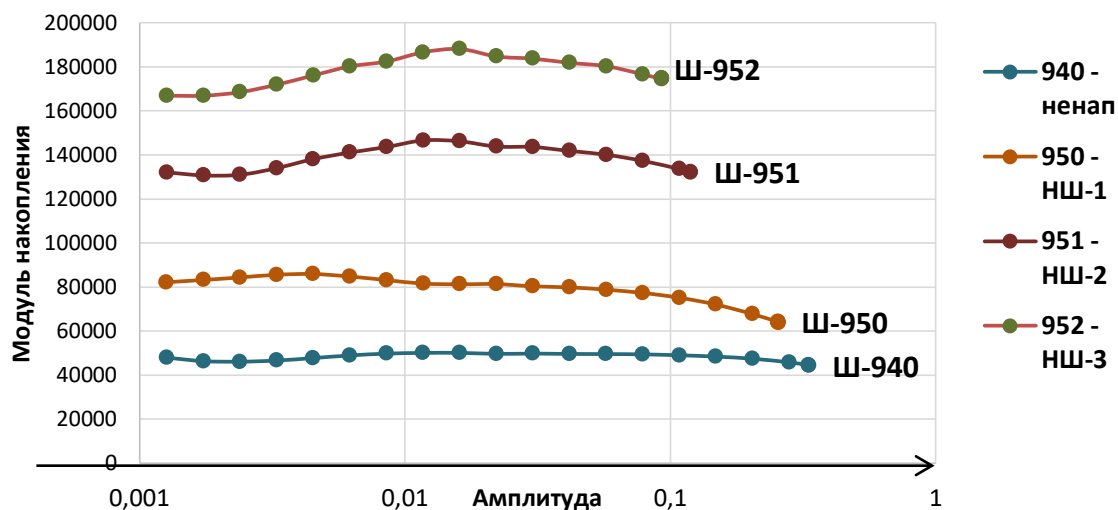


Рис. 1. Зависимость действительной составляющей динамического модуля упругости (модуля накопления) от амплитуды деформации

Физико-механические характеристики вулканизатов (рис. 2) на основе бутадиен-стирольного каучука СКС-30АРК, наполненные шунгитом, окисленным различными способами Ш-940, Ш-950, Ш-951, Ш-952 (смесь Ш-954 наполнена исходным наноразмерным шунгитом) определялись на разрывной машине UTS-10.

Среди образцов с окисленным шунгитом, образец Ш-950 обладал самой низкой прочностью, порядка 4,3 МПа при относительном удлинении в 331%, что, как видно из рис. 3 меньше, чем у образца Ш-954 с исходным наноразмерным шунгитом. Это может быть связано с измененной структурой шунгита в ходе окисления и, возможно, дополнительной адсорбцией диоксида марганца из реакционной смеси на этапе модификации наполнителя.

Учитывая довольно слабые кинетические характеристики вулканизации и низкие значения модуля упругости при определении эффекта Пейна, ожидаемо не высокий результат был получен и при определении физико-механических характеристик вулканизата наполненного образцом НШ-1.

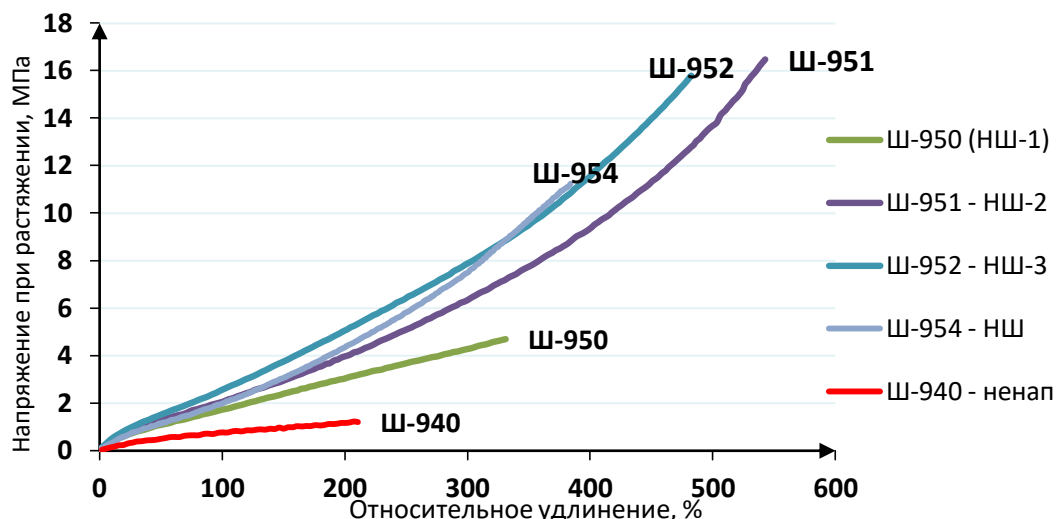


Рис. 2. Эффект упрочнения эластомерных композитов с шунгитом, окисленным различными способами (НШ-1: $\text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$; НШ-2: $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HCOOH}$; НШ-3: $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$)

Физико-механические характеристики образцов Ш-951 и Ш-952 оказались лучше, чем у образца Ш-954 с исходным наноразмерным шунгитом и образцом Ш-950. У образца Ш-951, наполненного шунгитом НШ-2, окисленным перекисью водорода в кислой среде наблюдалась прочность порядка 16,5 МПа, что на 5 МПа больше, чем у исходного образца с нанодисперсным шунгитом. У образца Ш-952, наполненного шунгитом НШ-3, окисленным перекисью водорода в нейтральной среде наблюдалась прочность порядка 15,5 МПа, что примерно на 4 МПа больше, чем у исходного образца с нанодисперсным шунгитом. При этом относительное удлинение образца Ш-951 тоже больше, чем у образца Ш-952, 543% и 486% соответственно. Однако при сравнении напряжений этих образцов при одинаковом относительном удлинении, в данном случае 400%, отмечается, что напряжение у образца Ш-952 выше, чем у Ш-951.

На основе полученных данных наблюдается значительное влияние химической модификации наполнителя – минерала шунгит, на эффект упрочнения полученных вулканизатов. Отмечается увеличение скорости вулканизации, увеличение максимального крутящего момента при определении кинетики вулканизации. При окислении нанодисперсного шунгита, для эластомерных композитов отмечается увеличение модуля упругости, большие напряжения при удлинении и прочности.

Литература

1. Yu. V. Kornev, O.V. Boiko, D.V. Guskov, N.A. Semenov. Experimental investigation of the reinforcing effect of organosilane-modified nanodispersed mineral shungite in elastomeric composites. // Composites: Mechanics, Computations, Applications. An International Journal, 2016. -3 (7): - p. 189-200.
2. Семенов П.Е., Корнев Ю.В., Гуськов Д.В. Усиление эластомерных композитов модифицированным микродисперсным шунгитом, Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2017, С. 324-325.
3. C.M. Roland. Reinforcement of Elastomers. // Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2016, pp 1-9.

АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ФАЗЫ ЦИРКОНИЯ

Смирнова Д.Е.¹, Гордеев И.С.^{1,2}

¹ ОИВТ РАН

² МФТИ

E-mail: d.e.smimov@gmail.com

Работа посвящена изучению фазовых переходов в цирконии и описанию свойств высокотемпературной фазы beta-Zr. Для решения поставленной задачи были выполнены серии атомистических расчетов, основанные на двух различных межатомных потенциалах [1,2]. Такой подход был выбран с целью получения детального описания структуры и термодинамических характеристик beta-Zr. Оба межатомных потенциала демонстрируют неустойчивое поведение фазы при низких температурах, но объясняют это явление разными причинами. Для одного из потенциалов [1] наблюдается механическая неустойчивость рассмотренной фазы, в то время как для потенциала [2] неустойчивость beta-Zr является чисто динамической. Обзор имеющихся экспериментальных данных показывает, что более корректно описывать beta-Zr через низкотемпературную динамическую неустойчивость. Выполненное моделирование для циркония, позволяет сделать вывод о том, что структура beta-Zr обнаруживает локальную некубическую симметрию. Наличие такой структурной особенности может объяснить аномально высокие величины коэффициента самодиффузии, наблюдающиеся для циркония в экспериментах. Полученную информацию о структуре фазы beta-Zr также можно использовать при анализе механизмов деформации циркония и сплавов на его основе (например, сплавов Zr-Nb).

Литература

1. M.I. Mendelev and G.J. Ackland, "Development of an interatomic potential for the simulation of phase transformations in zirconium," *Phil. Mag. Lett.*, 87, 349-359 (2007)
2. Smirnova, D. E., and S. V. Starikov (2017), "An interatomic potential for simulation of Zr-Nb system, *Computational Materials Science*," 129, 259-272

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Степанов Л. И.

Научный руководитель – к.т.н. Никитин А.Д.

МАИ, Институт №11, Кафедра физики конструкционных материалов

E-mail: LIS1700@yandex.ru

В результате развития нетрадиционных методов воздействия высокоэнергетическим электромагнитным полем (ВЭМП) на проводящие материалы предложена эффективная технология обработки при значительном сокращении времени и материальных затрат с улучшением эксплуатационных характеристик.

В частности, были проведены исследования, позволяющие установить влияние высокоэнергетического электромагнитного поля на конструкционную прочность алюминиевых (Д-1 - дюраль) и титановых (В91Т2) сплавов, характеристики трещиностойкости, циклической прочности, общей долговечности. Эксперименты проводились в режиме раздельного действия механической и циклической нагрузки (усталостные испытания). Усталостные испытания проводились на установке МУИ-6000 (изгиб с вращением). Образец нагружался до заданного уровня напряжений (близкого к пределу выносливости), до различной величины от среднего значения числа циклов до разрушения ($N_{ср-р}$). Таким образом в образце создавалась определенная степень накопления повреждаемости. После этого проводилась обработка высокоэнергетическим электромагнитным полем (контактным методом) с использованием источника промышленной частоты и высокой плотности энергии НИИТ-40 (ИПМех РАН).

В обоих случаях испытаний для материалов Д-1 и В91Т2 было установлено существенное увеличение прироста долговечности: в первом случае 26%, а во втором - 39%. Полученные результаты указывают на перспективность технологии восстановления ресурса элементов конструкции газотурбинного двигателя (например, лопаток компрессора).

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ОПРЕДЕЛЯЮЩЕГО СООТНОШЕНИЯ РАБОТНОВА ПО ДАННЫМ ИСПЫТАНИЙ ВЫСОКОНАПОЛНЕННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Стеценко Н. С.

Научный руководитель – профессор, д.ф.-м.н. Георгиевский Д. В.
МГУ, Механико-математический факультет, Кафедра теории упругости
E-mail: stetsenkonina@mail.ru

Доклад посвящен описанию процедуры идентификации и верификации определяющих соотношений Работнова применительно к экспериментам, проведенным над полиэтиленом. Актуальность работы может быть рассмотрена с точки зрения различных позиций. Во-первых, в последнее время полиэтилен высокой плотности стал широко использоваться в качестве структурного материала, например, для труб, используемых в линиях водо- и газоснабжения. Таким образом, с одной стороны, непосредственный интерес представляет исследование механических характеристик этого материала. С другой стороны, интерес представляет сама процедура идентификации с точки зрения апробации, уточнения и выявления возможных корректировок. Продемонстрирована возможная неоднозначность определения материальных функций в условиях ограниченного количества экспериментальных данных как по наличию типов экспериментов, так и по их длительности. Показана наибольшая сложность, с которой сталкивается исследователь при проведении подобной процедуры. Идентификация проводилась из эксперимента на ползучесть при мгновенном нагружении, а верификация для экспериментов на ползучесть при мгновенном нагружении для уровней напряжения, не участвовавших в идентификации; экспериментов при постоянной скорости напряжения (для двух значений скоростей); эксперимента при ступенчатом напряжении; эксперимента при сложном нагружении, состоящем из двух участков линейного возрастания напряжения и двух участков постоянного значения для двух различных уровней нагружения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-08-01146 а.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ПЛОСКОСТИ ДЛЯ МНОГООСНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ СО СДВИГОМ ФАЗ

Стратула Б.А.^{1,2}

Научный руководитель – профессор, д.ф.-м.н. Никитин И.С.

¹ МАИ, Кафедра физики конструкционных материалов

² ИАП РАН, Отдел математического моделирования

E-mail: stratula@matway.net

Опыт эксплуатации разнообразных конструкционных элементов показывает, что реальные циклические режимы и условия нагружения часто не могут быть воспроизведены в упрощённых лабораторных усталостных испытаниях, таких как растяжение, изгиб или кручение. Как правило, конструкционные элементы в эксплуатации находятся в условиях сложного (трехмерного) нагружения. Для расчета усталостной прочности в этом случае необходимо использовать многоосные критерии усталостного разрушения. Прогресс в материаловедении привёл к появлению многоосных критериев для разных областей усталостного нагружения, начиная с малоциклового усталости (МЦУ, $N \sim 10^3 - 10^5$), многоциклового усталости (МНЦУ, $N \sim 10^5 - 10^7$) и заканчивая сверхмногоциклового усталостью (СВМУ, $N \sim 10^8 - 10^{10}$) [1]. При рассмотрении области МНЦУ важную роль играют особенности усталостного разрушения. Амплитуда внешних нагрузок в таком случае будет мала (по сравнению с пределом текучести материала), что приводит к уменьшению количества систем скольжения, активируемых в материале при циклическом нагружении. Поэтому доминирующей становится одна система скольжения, то есть возникает выделенная плоскость, в которой происходит движение дислокаций, которую называют критической плоскостью. Это позволило создать и анализировать современные критерии многоосного усталостного разрушения, учитывающие ориентацию такой критической плоскости [2-5].

Данная работа предлагает процедуру расчёта ориентации критической плоскости при многоосных циклических нагрузках с произвольным сдвигом фаз для классического усталостного диапазона – малоциклового (МЦУ) и многоциклового усталости (МНЦУ), основанную на хорошо апробированном критерии Papadopoulos [2]. Приводится сравнение экспериментальных данных и аналитического решения.

Критерий записывается в следующей форме:

$$\max T_a + \alpha_{\infty} \sigma_{H, \max} \leq \gamma_{\infty},$$

где слагаемое $\max T_a$ является максимальным разбросом касательного напряжения на всём множестве площадок, проходящих через заданную точку пространства за один цикл нагружения. Слагаемое $\alpha_{\infty} \sigma_{H, \max}$ является эквивалентной максимальной величиной гидростатического давления в заданной точке за один цикл нагружения.

Хотя критерий позволяет анализировать любое возможное напряжённое состояние, в данной работе рассмотрим только один случай: одновременные изгиб и кручение образца с одинаковыми периодами нагрузок, произвольными величинами среднего напряжения, амплитуды и сдвига фазы.

Тензор напряжений будет иметь вид:

$$\sigma(t) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{yz} + A_{yz} \cos(2\pi t + \delta) \\ 0 & M_{yz} + A_{yz} \cos(2\pi t + \delta) & M_{zz} + A_{zz} \cos(2\pi t) \end{pmatrix},$$

где M - постоянная величина напряжения, A - амплитуда периодической нагрузки, δ - сдвиг по фазе между нагрузкой на изгиб и нагрузкой на кручение.

Перейдём к главным напряжениям. Интересующее сдвиговое напряжение на произвольной площадке запишется в виде [3]:

$$\tau = \sqrt{(\hat{\sigma}_{11}n_1 - \hat{\sigma}_m n_1)^2 + (\hat{\sigma}_{22}n_2 - \hat{\sigma}_m n_2)^2 + (\hat{\sigma}_{33}n_3 - \hat{\sigma}_m n_3)^2}, \text{ где } \hat{\sigma}_m = \hat{\sigma}_{11}n_1n_1 + \hat{\sigma}_{22}n_2n_2 + \hat{\sigma}_{33}n_3n_3$$

Тильдой (крышкой) обозначены компоненты напряжений в главных осях.

Точки экстремума по шкале времени имеют следующее выражение для вычисления, полученное путём дифференцирования τ по t и решением полученного уравнения:

$$t = \arctan \left(\frac{4A_{yz} \sin(\delta) [2A_{yz} R^2 \cos(\delta) - A_{yz} \cos(\delta)]}{RA_{zz}^2 - 4RA_{yz}^2 + 8RA_{yz}^2 \cos(\delta)}, R \right) / (2\pi)$$

где R принимает значения: $\frac{\sqrt{N_4} + \sqrt{N_6}}{2}; \frac{\sqrt{N_4} - \sqrt{N_6}}{2}; -\frac{\sqrt{N_4} - \sqrt{N_6}}{2}; -\frac{\sqrt{N_4} + \sqrt{N_6}}{2}$

$$N_2 = 288ea^2 - 8a^3; \quad N_3 = \frac{2(12ea + a^2)}{3a^3\sqrt{N_2}}; \quad N_4 = \frac{\sqrt[3]{N_2}}{6a} + \frac{2}{3} + N_3; \quad N_6 = \frac{4}{3} - \frac{\sqrt[3]{N_2}}{6a} - N_3;$$

$$a = 16A_{yz}^2 A_{zz}^2 \cos^2(\delta) + 16A_{yz}^4 - 8A_{yz}^2 A_{zz}^2 + A_{zz}^4; \quad e = 16A_{yz}^4 - 16A_{yz}^4 \sin^4(\delta) - 16A_{yz}^4 \cos^2(\delta)$$

Перебор 4 точек экстремума приводит к значению времени в момент максимального сдвигового напряжения.

В завершение остаётся совершить переход от системы координат, связанной с осями главных напряжений, обратно к исходной. Вектор, нормальный к площадке, напряжения на которой инициируют максимальное сдвиговое напряжение, будет иметь следующие компоненты в исходной системе координат:

$$n_x = 0, \quad n_y = -\sqrt{\left(\sigma_{33}\sqrt{4\sigma_{23}^2 + \sigma_{33}^2} + 2\sigma_{23}^2 + \sigma_{33}^2\right)} / K, \quad n_z = -2\sigma_{23}n_y / (\sigma_{33} + \sqrt{4\sigma_{23}^2 + \sigma_{33}^2})$$

Площадка с максимальным сдвиговым напряжением будет повёрнута на 45° в плоскости yz .

Сравнение экспериментальных результатов [4], расчётов [5] и расчётов по критерию [2] с использованием приведённой в данной работе методики аналитического поиска ориентации критической плоскости приведено в Таблице.

Таблица

σ (МПа)	τ (МПа)	δ	$\alpha(*\pi)$ эксп.	$\alpha(*\pi)$ Карп.	$\alpha(*\pi)$ Пар.
0	201,11	0	0,249	0,25	0,25
162,85	195,69	0	0,194	0,193	0,193
274,68	137,34	0	0,128	0,125	0,125
141,95	171,18	$\pi/6$	0,177	0,197	0,193
255,06	127,53	$\pi/6$	0,09	0,119	0,125
147,15	177,56	$\pi/3$	0,12	0,206	0,213
255,06	127,53	$\pi/3$	0,045	0,094	0,125
152,45	184,23	$\pi/2$	0,158	0,207	0,0
264,87	132,44	$\pi/2$	0	0,076	0,0
308,03	63,86	$\pi/2$	0	0,055	0,0

Литература

1. Bathias C., Paris P.C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. New York. Dekker. 2005.
2. Papadopoulos I. V. Long life fatigue under multiaxial loading// International Journal of Fatigue. 2001. Vol. 23. Pp. 839-849.
3. Никитин И.С., Бураго Н.Г., Никитин А.Д., Якушев В.Л. Определение критической плоскости и оценка усталостной долговечности при различных режимах циклического нагружения // Вестник ПНИПУ. Механика. 2017. № 4. С.238-252.
4. Nishihara T., Kawamoto M. The strength of metals under combined alternation bending and torsion with phase difference// Memories of the College of Engineering, Kyoto Imperial University. 1945. V. 11. Pp. 85-112.
5. Carpinteri A., Karolczuk A., Macha E. and Vantadori S. Expected position of the fatigue plane by using the weighted mean principal Euler angles// International Journal of Fatigue. 2002. Vol. 115. Pp. 87-99.

ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА НА ЕГО ПРЕДЕЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ ОПЕРАЦИЯХ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Сурудин С.В., Ерисов Я.А., Кузин А.О.

Самарский университет

E-mail: alexandrkuzin88@gmail.com

Методом конечных элементов выполнен анализ влияния кристаллографической ориентации структуры материала на его предельные деформационные возможности на примере четырех типовых операций листовой штамповки: формовка, отбортовка, вытяжка и гибка. Определено, что наилучшую штампуемость (максимальная глубина лунки, коэффициент отбортовки, глубина стаканчика, минимальный радиусгиба) обеспечивает идеальная кристаллографическая ориентировка $\{100\}<011>$; минимальную - $\{110\}<001>$. При этом некоторые компоненты текстуры обеспечивают большие деформационные возможности по сравнению с изотропным случаем ($\{100\}<011>$), некоторые – меньшие ($\{100\}<001>$, $\{110\}<001>$) или близкие к изотропии ($\{112\}<111>$, $\{110\}<112>$, $\{123\}<634>$).

Введение. Как известно, такие широко распространенные в производстве аэрокосмической техники полуфабрикаты как листы, ленты, профили, трубы и т.д. обладают явно выраженной анизотропией свойств. Игнорирование в технологических расчетах анизотропии свойств не только снижает потенциальные деформационные возможности заготовок, но и приводит к целому ряду других нежелательных явлений: повышенному расходу металла, ограничению предельно допустимой деформации, искажению формы, размеров и снижению эксплуатационных параметров продукции [1-4]. С другой стороны, рациональная анизотропия является серьезным фактором интенсификации процессов формообразования материалов и повышения эксплуатационных характеристик изделий в определенных направлениях [5-6].

Оптимальную анизотропию свойств для конкретного процесса можно определить методами компьютерного моделирования, современный уровень развития которых позволяет значительную часть работ по оценке и анализу напряженно-деформированного состояния перенести в область численного эксперимента; получить больший объем информации; провести всестороннее исследование не только процессов формообразования, но и характера поведения материала в этих процессах в зависимости от его структурного состояния; рассмотреть и сопоставить большее количество альтернативных вариантов [7].

Учесть кристаллографическую ориентацию структуры и сформулировать требования к ней позволяет разработанный в [8-9] критерий пластичности, особенностью которого является то, что в него в явном виде входят параметры кристаллографической ориентации структуры и константы кристаллической решетки. На основе данного критерия была разработана модель материала, что позволило проводить анализ процессов пластического деформирования с учетом кристаллографической ориентации структуры заготовок.

Используя данную модель материала, изучено влияние кристаллографической ориентации структуры материала на его предельные деформационные возможности в различных операциях листовой штамповки (формовка, вытяжка, гибка, отбортовка).

Методы. Размеры и геометрия моделей соответствуют стандартным испытаниям на выдавливание лунки по методу Эриксона, (ГОСТ 10510-80), отбортовку (ISO 16630), фестонистость (EN 1669) и изгиб с переменным радиусом по методу Гюта [10]. Во всех случаях толщина заготовки соответствует 1 мм. Конечно-элементные модели выполнены с использованием 4-х узловых оболочных конечных элементов с 5 точками интегрирования по толщине. С целью сокращения количества элементов моделировалась $1/4$ объема, для гибки $1/2$. Между инструментом и заготовкой задавались контактные пары, трение на которых подчиняется закону Кулона (коэффициент трения принят равным 0,12). Деформирующий инструмент принимался абсолютно жестким.

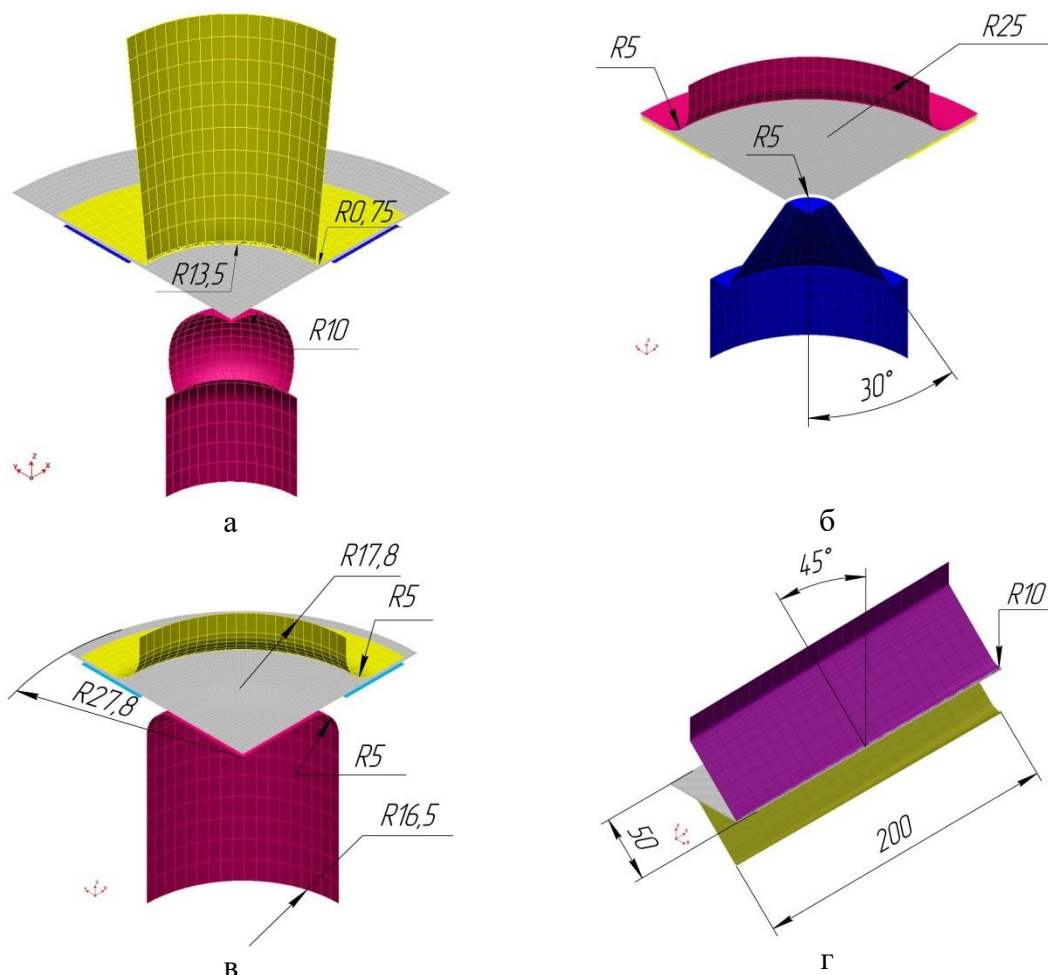


Рисунок 1 – Конечно-элементные модели: а - формовка; б - отбортовка; в - вытяжка; г – гибка с переменным радиусом

С целью оценки влияния кристаллографии структуры на штампуемость моделировался анизотропный материал, текстура которого представлена только одной идеальной кристаллографической ориентировкой. Рассмотрены наиболее характерные для листового проката ориентировки [11] деформационного типа: медь $\{112\}\langle 111\rangle$, латунь $\{110\}\langle 112\rangle$, S $\{123\}\langle 634\rangle$, куб на ребре $\{100\}\langle 011\rangle$; и рекристаллизационного типа: куб $\{100\}\langle 001\rangle$ и Госс $\{110\}\langle 001\rangle$.

В данной работе приведены параметры процессов формовки, отбортовки, вытяжки и гибки в момент начала разрушения ($\psi=0,9$). Из представленных данных видно, что максимальные деформационные возможности материала (максимальная глубина лунки, коэффициент отбортовки, глубина стаканчика, радиусгиба) обеспечивает идеальная кристаллографическая ориентировка $\{100\}\langle 011\rangle$; минимальную - $\{110\}\langle 001\rangle$. При этом некоторые компоненты текстуры обеспечивают лучшую штампуемость по сравнению с изотропным случаем ($\{100\}\langle 011\rangle$), а некоторые худшую ($\{100\}\langle 001\rangle$, $\{110\}\langle 001\rangle$) или близкую к изотропии ($\{112\}\langle 111\rangle$, $\{110\}\langle 112\rangle$, $\{123\}\langle 634\rangle$).

Вывод. Таким образом, при разработке термомеханических режимов производства листов из алюминиевых сплавов, в том числе алюминий-литиевых, необходимо назначать согласованные режимы прокатки и промежуточной термической обработки (отжига), т.к. только сочетание различных идеальных кристаллографических ориентировок деформационного и рекристаллизационного типов может обеспечить повышение деформационных возможностей в технологических процессах обработки металлов давлением. При этом для каждого конкретного процесса формообразования состав компонент текстуры будет индивидуальным.

Литература

1. Engler O., Hirsch J. Texture control by thermomechanical processing of AA6xxx Al-Mg-Si sheet alloys for automotive applications - a review // *Materials Science and Engineering A*. 2002. Vol. 336. P. 249-262.
2. Banabic D., Bunge H. J., Pohlandt K., Tekkaya A.E. Formability of metallic materials: plastic anisotropy, formability testing, forming limits. Berlin: Springer. 2000. 334 p.
3. Tóth L.S., Hirsch J., Van Houtte P. On the role of texture development in the forming limits of sheet metals // *International Journal of Mechanical Sciences*. 1996. Vol. 38. P. 1117-1126.
4. Barlat F. Crystallographic texture, anisotropic yield surfaces and forming limits of sheet metals // *Materials Science and Engineering*. 1987. Vol. 91(C).P. 55-72.
5. Venkateswara Rao K.T., Bucci R.J., Jata K.V., Ritchie R.O. A comparison of fatigue-crack propagation behavior in sheet and plate aluminum-lithium alloys // *Materials Science and Engineering*. 1991. Vol. A141. P. 39-48.
6. Banabic D., Barlat F., Cazacu O., Kuwabara T. Advances in anisotropy and formability // *International Journal of Material Forming*. 2010. Vol. 3.P.165-189.
7. Raabe D., Roters F., Barlat F., Chen L.Q. Continuum Scale Simulation of Engineering Materials. Berlin: WILEY. 2004. 885 p.
8. Erisov, Y.A., Grechnikov, F.V., Surudin, S.V. Yield function of the orthotropic material considering the crystallographic texture // *Structural Engineering and Mechanics*, 58 (4). 2016. P. 677-687.
9. Grechnikov, F.V., Erisov, Y.A. Virtual material model with the given crystallographic orientation of the structure // *Key Engineering Materials*. 684. 2016. P. 134-142.
10. Аверкиев, А.Ю. Методы оценки штампуемости листового металла [Текст] // А.Ю. Аверкиев. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.
11. Choi, S.H., Cho, J.H., Barlat, F., Chung, K., Kwon, J.W. and Oh, K.H. Prediction of yield surfaces of textured sheet metals // *Metallurgical and materials transactions*. 30 (A). 1999. P. 377-386.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ В ПРОЦЕССАХ ИНТЕНСИВНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Тельканов М.А.

Научный руководитель – доцент, к.ф.-м.н. Волегов П.С.

ПНИПУ

E-mail: michaelperm@gmail.com

В работе исследуется математическая модель деформирования поликристалла, учитывающая процессы, сопровождающие интенсивные неупругие деформации поликристаллических материалов и приводящие к измельчению его зеренной структуры. Предложен способ описания фрагментно-зеренной структуры поликристалла с использованием топологического весового графа.

В настоящее время проблема получения ультрамелкозернистых поликристаллических материалов стоит достаточно остро. Подобные материалы обладают повышенным пределом текучести по сравнению с крупнозернистыми материалами, поэтому область их применения весьма обширна. Однако, в настоящее время остается не ясным, какие конкретно физические механизмы и характеристики материала вносят наибольший вклад в процесс измельчения зеренной структуры, и, как следствие, отсутствует возможность управлять процессом измельчения при изготовлении материала или конструкции с целью получения наперед заданного распределения зерен по размерам и/или форме. Таким образом, задача описания процесса измельчения зеренной структуры и построения соответствующих математических моделей остается актуальной.

Под термином «измельчение» исследователи понимают сразу несколько физических процессов, приводящих к уменьшению среднего размера зерна. К ним относят как дробление – процесс, являющийся по сути хрупким внутризеренным разрушением, так и процесс ориентационной фрагментации – относительно плавного разворота областей кристаллической решетки друг относительно друга. До последнего времени методы исследования точечных дефектов кристаллических решеток для анализа зеренной структуры материала практически не применялись, вследствие чего современные представления о механизмах измельчения в значительной мере основаны на исследовании закономерностей в изменении типов различных дислокационных структур, а также дисклинаций. Установлено, что изначально однородная дислокационная структура с увеличением деформаций трансформируется в дислокационные клубки и достаточно плотные стенки дислокаций, которые, в свою очередь, преобразуются в границы субзерен, обладающих малой разориентацией [1]. При продолжающейся интенсивной пластической деформации (ИПД) разориентировки граничащих областей растут, и вновь образованные границы фрагментов становятся источниками дальнейшей фрагментации, т.е. процесс повторяется и воспроизводит сам себя до момента достижения некоторого предельного размера зерна, зависящего в общем случае как от свойств материала, так и от рассматриваемого типа обработки.

Целью работы является разработка математической модели упругопластического деформирования поликристаллического агрегата с учетом измельчения зеренной структуры материала и изменения ориентаций кристаллитов. В рамках работы используется двухуровневая математическая модель упругопластического деформирования, элементом верхнего масштабного уровня которой является представительный макрообъем поликристалла с ОЦК решеткой, а элементами нижнего уровня – фрагменты, сгруппированные в зерна, имеющие большеугловые разориентировки.

Движущей силой фрагментации в литературе чаще всего называют мощные упругие напряжения, возникающие в кристаллите вследствие несовместности пластических деформаций в граничащих зернах [2]. Для учета подобной несовместности в работе используется соответствующая подмодель, подробно описанная, например, в [3]. Для описания дробления используется критерий, согласно которому, при достижении некоторой критической мощности стыковых и граничных дисклинационных дефектов становится энергетически выгодной трансформация зеренной структуры, включающая как

формирование внутризеренных малоугловых границ, так и повороты кристаллических решеток зерен и их фрагментов (элементов ротации).

Модель построена по следующему структурному принципу: каждое зерно в недеформированном состоянии представляется связной совокупностью фрагментов, имеющих одинаковую ориентацию. При деформировании приграничные фрагменты начинают процесс разворотов, постепенно вовлекая в него все более отдаленные от границ фрагменты. Для удобства работы при таком подходе был построен весовой граф, характеризующий топологию фрагментно-зеренной структуры представительного макрообъема. Весом дуг графа при этом выступает значение специально введенной меры разориентации кристаллических решеток граничащих элементов. Мера основана на взаимном расположении проекций кристаллографических направлений сравниваемых решеток на стандартном стереографическом треугольнике. Используя процедуру обхода построенного графа, можно проводить поиск элементов ротации и выделять большеугловые границы в представительном объеме. Все это позволяет проводить оценку среднего размера зерна в поликристалле.

С использованием построенной модели был проведен ряд численных экспериментов по различным видам нагружения представительного объема материала, характеристики которого соответствовали конструкционной стали 45. В результате была получена зависимость среднего размера зерен и доли большеугловых границ от величины накопленных деформаций. Предложен алгоритм поиска элементов ротаций с использованием графа фрагментной структуры. Показано, что мощность необратимых разворотов составляет значительную долю полной мощности системы, таким образом их учет в подобных моделях представляется необходимым.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-1298.2017.1.

Литература

1. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
2. Сарафанов Г.Ф., Перезвенцев В.Н. Закономерности деформационного измельчения структуры металлов и сплавов. Нижний Новгород, 2007, 96 с.
3. Трусов П.В., Ашихмин В.Н., Волегов П.С., Швейкин А.И. Моделирование эволюции структуры поликристаллических материалов при упругопластическом деформировании // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. – 2010. – № 4. – С. 225-237.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ЛОКАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ДОЗВУКОВЫХ РЕЖИМОВ ВЧ-ПЛАЗМОТРОНА НА УСЛОВИЯ ВХОДА ЗАТУПЛЕННОГО ТЕЛА В АТМОСФЕРУ

Тептеева Е.С.¹, Колесников А.Ф.²

¹МАИ

² ИПМех РАН

E-mail: elrick.com@mail.ru

Теория локального термохимического моделирования применена для установления соответствия параметров дозвуковых струй воздушной плазмы в ВЧ-плазмотроне условиям входа в атмосферу затупленного тела с гиперзвуковой скоростью. Рассчитаны высота полета, скорость полета и радиус кривизны носка тела в зависимости от мощности ВЧ-генератора.

Введение. Лабораторное моделирование условий аэродинамического нагрева космических аппаратов при спуске с орбиты является необходимым этапом разработки систем тепловой защиты. Современные высокоэнтальпийные газодинамические установки, в том числе ВЧ-плазмтроны [1], не позволяют осуществить полное моделирование всех факторов, влияющих на движение и нагрев аппарата при входе в атмосферу с гиперзвуковой скоростью. Поэтому принципиально важно решение вопросов [4] о соответствии параметров газовых потоков и неравновесных процессов, реализуемых в экспериментальных установках, натурным условиям, определяющим термохимическое воздействие высокотемпературного диссоциированного воздуха на тепловую защиту аппарата.

Метод и результаты. Задача состояла в установлении соответствия параметров экспериментов на ВЧ-плазмтроне ВГУ-4 по теплообмену цилиндрической модели диаметром 20 мм в дозвуковых струях воздушной плазмы и условий входа в атмосферу затупленного тела с гиперзвуковой скоростью. В качестве условий локального термохимического моделирования для двух потоков используются равенства полных энтальпий, давлений торможения и градиентов скорости в критических точках модели и тела.

Первое условие моделирования (энергетическое) представляет собой равенство полных энтальпий двух потоков и имеет вид

$$H_s = H_\infty \quad H_s = \frac{V_s^2}{2} + h_s \approx h_e \quad H_\infty = \frac{V_\infty^2}{2} \quad (1)$$

Здесь H – полная энтальпия, h – статическая энтальпия, V – скорость потока. Индекс S относится к параметрам дозвукового потока в ВЧ-плазмтроне, e – к внешней границе пограничного слоя и ∞ – к параметрам натурального равномерного гиперзвукового потока.

Из формулы (1) определяем скорость гиперзвукового потока, соответствующую условиям эксперимента на ВЧ-плазмтроне

$$V_\infty = \sqrt{2h_e} \quad (2)$$

Второе условие моделирования (динамическое) представляет собой равенство давлений торможения двух потоков и имеет вид

$$P_{wo} = \rho_\infty V_\infty^2 \quad (3)$$

где P_{wo} – давление торможения дозвукового потока в критической точке модели, ρ_∞ – плотность воздуха в невозмущенной атмосфере. После того как из (3) определено ρ_∞ , высоту гипотетического полета S находим по таблицам стандартной атмосферы.

Третье условие моделирования (кинематическое) представляет собой равенство градиентов скорости в критических точках модели (β_p) и тела (β_f) и имеет вид

$$\beta_p = \beta_f \quad \beta_p = \frac{V_s}{R_m^*} = u_{1w} \frac{V_s}{R_m} \quad \beta_f = \left(\frac{8}{3} k \right)^{1/2} \frac{V_\infty}{R_N} \quad (4)$$

Здесь R_m^* - эффективный радиус модели, который зависит от геометрии поверхности и геометрии дозвуковой струи, R_m - радиус цилиндрической модели, u_{1w} - безразмерный градиент компоненты скорости вдоль поверхности модели, k - отношение ρ_∞ / ρ_e плотностей в невозмущенном гиперзвуковом потоке и на внешней границе пограничного слоя ($0.06 \leq k \leq 0.1$), R_N - радиус затупленного тела в критической точке.

Из (4) имеем выражение для нахождения радиуса затупленного тела в критической точке:

$$R_N = \left(\frac{8}{3} k \right)^{1/2} \frac{V_\infty R_m}{u_{1w} V_s} \quad (5)$$

В качестве исходных данных при давлении 100 ГПа использовались экспериментальные зависимости энтальпии и скорости воздушной струи от мощности ВЧ-генератора в диапазоне $N_{ap} = 20-75$ кВт. Параметры обтекания цилиндрической модели с плоским носком радиуса 10 мм дозвуковой струей воздушной плазмы пересчитаны на параметры обтекания затупленного тела гиперзвуковыми потоками воздуха по формулам (2), (3) и (5). Результаты расчетов приведены в таблице.

Таблица

h _e МДж/кг	V _s м/с	U _{1w}	V _∞ м/с	ρ _∞ кг/м ³	R _N м	S км
11,6	191	0,595	4817	0,000431	0,20	57,2
14,77	220	0,584	5435	0,000339	0,20	59,4
18,74	258	0,580	6122	0,000267	0,19	61,2
21,45	285	0,576	6550	0,000233	0,18	62,2
24,25	312	0,565	6964	0,000206	0,18	63,2
26,93	331	0,563	7339	0,000186	0,18	64,0
28,97	351	0,561	7612	0,000173	0,18	64,6
31,04	373	0,550	7879	0,000161	0,18	65,0
32,78	396	0,544	8097	0,000153	0,17	65,4
34,57	415	0,540	8315	0,000145	0,17	65,8
36,46	440	0,523	8539	0,000137	0,17	66,3
37,94	470	0,515	8711	0,000132	0,17	66,6

Закключение. В результате расчетов установлено, что дозвуковые режимы обтекания цилиндрической модели с плоским носком диаметром 20 мм струями воздушной плазмы в установке ВГУ-4 при давлении 10^4 Па и мощности ВЧ-генератора 20 – 75 кВт соответствуют условиям входа в атмосферу затупленного тела с радиусом носка 0.20–0.17 м со скоростью в диапазоне 4817-8711 м/с при высоте полета 57.2-66.6 км.

Литература

1. Гордеев А.Н., Колесников А.Ф. Индукционные плазмотроны серии ВГУ. В сб.: Актуальные проблемы механики. Физико-химическая механика жидкостей и газов. М., Наука, 2010. с.151-177.

2. Колесников А.Ф. Условия моделирования в дозвуковых течениях теплопередачи от высокоэнтальпийного потока к критической точке затупленного тела // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1993. № 1. С. 172-180.
3. Колесников А.Ф. Условия локального подобия термохимического взаимодействия высокоэнтальпийных потоков газов с неразрушаемой поверхностью // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 1. С. 118-125.
4. Колесников, А. Ф., Вопросы локального моделирования термохимического взаимодействия высокоэнтальпийных потоков газов с поверхностью, 2001.

СЛОЖНОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С ПРОВЕДЕНИЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ МЕТАЛЛОВ

Терауд В.В., Валисовский Н.Е.

НИИ механики МГУ

E-mail: wne3-v@rambler.ru

Решена задача образования шейки (локализация деформаций) при высокотемпературном растяжении алюминиевых и титановых образцов в испытаниях на ползучесть. Основное внимание уделено моменту образования шейки и её последующему развитию.

Описание задачи. Решена задача об изучении образования шейки (локализация деформаций) при высокотемпературном растяжении алюминиевых и титановых образцов в испытаниях на ползучесть. Основное внимание уделено моменту образования шейки и её последующему развитию. При проведении натурных экспериментов возникли технические сложности, о решении которых рассказано в данной работе.

Подготовка и проведение экспериментов. Изучение шейки проводится в натурных экспериментах. Образец, изготовленный в соответствии с требованиями ГОСТа, закрепляется в нагревательной печи вертикально, нагревается до рабочей температуры (400°C для алюминия и 600°C для титана) и нагружается растягивающим усилием при помощи гирь. Гири укладываются на платформу, соединенную с нижней тягой. Процесс растяжения происходит до момента разрушения образца.

Для измерения параметров деформирования применяется разработанный метод, основанный на фотоаппарате. Для фотографирования образца при высокотемпературном деформировании в печи вырезано отверстие, закрытое кварцевым стеклом. Внутри печи установлена галогеновая лампа, освещающая образец, позволяющая получать чёткие снимки для надёжного визуального распознавания образца. Удалось добиться надёжной работы лампы и хорошего освещения при высокой рабочей температуре. При экспериментах обнаружилось, что печь не держит рабочую температуру 600°C, в отличие от стабильной работы при 400°C. Для решения проблемы тяги были обмотаны асбестовыми канатами, а отверстия закрыты асбестовым листом, препятствующим конвективному охлаждению рабочей зоны.

Во время эксперимента проводится фотосъёмка образца с частотой 1 кадр на каждые 0.1 мм его удлинения. Данную задачу выполняет электронный прибор, измеряющий растяжение по тягам испытательной машины. Он подключён к источнику постоянного напряжения 5В, что позволяет проводить эксперименты любой длительности. Первоначальная версия прибора использовала шесть батарей, заряда которых хватало только на одни сутки.

Для контроля многосуточных экспериментов создано видеонаблюдение с помощью четырёх веб-камер, направленных на экспериментальную установку и нагревательный блок, и видеосервера на базе мини-ПК. К видеосерверу настроен удалённый доступ извне (через Интернет), что позволяет контролировать протекание длительного эксперимента из любой точки мира.

Для оценки деформаций образца изначально предполагалось использовать известный метод DIC. Однако после серии предварительных испытаний оказалось, что при высоких температурах данный метод не работает. Поэтому был разработан собственный программный комплекс. Также на поверхность плоских образцов с помощью особого станка наносится неглубокая сетка, по узлам которой при последующей компьютерной обработке исследуется деформация шейки.

Обработка экспериментальных данных. Из натурных экспериментов получаются файлы фотографий образца в формате JPG, с EXIF-данными о моменте съёмки. Эти фотографии обрабатываются на мощной рабочей станции. Нами был разработан и написан программный комплекс, реализующий данную обработку. Комплекс работает в полуавтоматическом режиме: на каждом кадре интеллектуально распознаются границы рабочей области образца и заранее намеченные узлы сетки в окрестности области появления деформации. Если автоматический модуль некорректно распознал какую-то область, то возможна ручная корректировка. Данная программа создаёт трёхмерную числовую модель

деформации образца. По этим моделям из всех экспериментов собираются статистические данные, по которым выявляются интересующие закономерности и критерии.

Результаты. Решение возникших проблем позволило проводить длительные (в течение дней и недель) натурные испытания, из которых, с помощью созданного программного комплекса, получены уникальные данные об образовании и развитии шейки при высокотемпературной ползучести.

Планы дальнейших работ. Электронный прибор, управляющий фотоаппаратом, будет доработан для исследований в более широком диапазоне растяжений. Планируется оптимизировать применяемые в программном комплексе алгоритмы. Программный комплекс будет переведен на распознавание в автоматическом режиме с минимальным участием оператора или без него. Планируется внедрение параллелизма в обработке фотокадров и расчёте результатов, в том числе применение технологии OpenCV (компьютерное зрение, для качественной обработки и распознавания изображений) и OpenCL (для параллельных вычислений на мощностях видеокарты).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-38-60200.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО РАДИАЛЬНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Тесаков Д.М.

Научный руководитель – профессор, д.т.н. Черняев А.В.

ТулГУ, Механико-технологический / политехнический факультет, Кафедра МПФ

E-mail: Tasakov92@yandex.ru

Известно, что процессы обработки металлов давлением (ОМД) сопряжены с рядом проблем, решение которых может существенно повысить качество получаемых деталей, а также интенсифицировать производство в целом. Расширение номенклатуры получаемых деталей является одним из приоритетных направлений процессов ОМД. В настоящее время существует большое количество подходов и теоретических методов, позволяющих оценить различные параметры при осуществлении пластической деформации. В последние годы широкое внедрение в производстве летательных аппаратов, узлов для изделий, применяемых в космической отрасли и т.д. нашло применение различных сплавов, позволяющих улучшить технические характеристики готовых аппаратов.

Промышленность требует постоянного совершенствования технологических операций и приемов, используемых для изготовления деталей ответственного назначения с особыми требованиями к прочности, износостойкости и т.д. Из большого числа методов ОМД особенно выделяется изотермическое выдавливание, т.к. оно позволяет особенно точно контролировать напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе деформирования, что дает нам возможность для расширения номенклатуры получаемых изделий, в частности для авиационной и космической техники. Кроме того, исследования, проводимые с различными сплавами, например, титановый сплав ВТ20, показывают, что температура является одним из самых значимых факторов, влияющих на повреждаемость заготовок при выдавливании.

Одной из достаточно широко распространенных форм изделий, применяемых в рассматриваемых отраслях промышленности, являются всевозможные патрубки со сложной формой внутренней полости. Получение таких деталей методом выдавливания имеет ряд преимуществ перед другими способами обработки металлов давлением: высокий коэффициент использования металла, интенсификация производства, улучшение качества готовых деталей.

В работе исследуются силовые параметры процесса изотермического радиального выдавливания заготовок из специальных сплавов, кроме того, анализируется характер напряженно-деформированного состояния заготовки в ходе выдавливания, что позволяет оценить предельные возможности формоизменения при изменении ключевых параметров процесса. Основным теоретическим методом, используемым для поиска оптимальных режимов деформирования, является метод верхних оценок. Он позволяет получить достаточно точные зависимости, которые могут иметь широкое практическое применение для изготовления деталей рассматриваемой конфигурации.

В настоящее время проводится работа по обобщению результатов, полученных при помощи метода верхней оценки усилия пластического формоизменения при изотермическом радиальном выдавливании деталей из материалов, применяемых в аэрокосмической отрасли. Планируется разработка рекомендаций для технологических процессов, используемых в серийном изготовлении патрубков со сложной формой внутренней полости. Кроме того, в программных пакетах MathCAD, MathLab и т.д. построены графические зависимости типового процесса выдавливания, основой для которых являются закономерности, полученные ранее в ходе теоретических расчетов.

Работа имеет важное прикладное значение и широкие перспективы для внедрения в реальные производственные процессы.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ЗАРОЖДЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ ПРИ СВМУ НАГРУЖЕНИИ

Тишин Н. А.

Научный руководитель — к.т.н. Никитин А.Д.

МАИ, Факультет №8, Кафедра 813

E-mail: nikitatishin5@yandex.ru

Опыт эксплуатации авиационных двигателей показывает, что досрочный выход из строя элементов газотурбинных двигателей (ГТД) связан с высокочастотным нагружением. Экспериментальное исследование спектра собственных частот лопаток показывает, что характерная вибрационная нагрузка лежит в диапазоне от 1 до 4.5 кГц. Таким образом, за счет высокой частоты, количество накопленных циклов нагружения часто превосходит 10^9 циклов, за характерный срок службы элементов ГДТ. При этом амплитуды таких вибраций не велики, и зачастую не превосходят усталости материала. Именно с этим связан тот факт, что эти вибрационные нагрузки не учитываются при проектировании изделий, а усталостные свойства материалов определяются на базах испытаний до 10^7 – 10^8 циклов. Однако, исследования в области усталостного поведения конструкционных материалов при больших наработках (порядка 10^8 — 10^{10} циклов) показывает о возможности их разрушения под действием нагрузок, не превосходящих классический предел усталости. При этом механизм зарождения усталостной трещины принципиально меняется: в отличие от областей малоциклового (МЦУ) и многоциклового усталости (МНЦУ), в области больших долговечностей или сверхмногоциклового усталости (СВМУ) зарождение трещины происходит из-под поверхности.

Подповерхностное зарождение усталостных трещин в области СВМУ, как правило, связано с наличием микроструктурного дефекта. Для сталей, например, характерно наличие неметаллических включений, в алюминиевых сплавах подповерхностное зарождение связано с наличием литейных дефектов или пор и т. д. Однако, подповерхностное зарождение в СВМУ режиме, так же возможно и в отсутствие явного дефекта. Примером таких зарождение может служить трипольные точки для сталей с большим (порядка 100 микрон) размером зерна. В случае двухфазных авиационных титановых сплавов, наличие дефектов микроструктуры является крайне редким явлением, однако сама микроструктура достаточно сложна. В данной ситуации вопрос о механизмах зарождения подповерхностной трещины при СВМУ нагружении становится актуальным.

В настоящей работе проводится анализ механизмов зарождения подповерхностных трещин в двухфазных титановых сплавах при СВМУ нагружении. Показывается взаимосвязь механизма зарождения с усталостной долговечностью образцов. Проводится анализ поверхностей излома с особенностями микроструктуры и делается вывод о позитивных и негативных влияниях ее особенностей.

ПОСТРОЕНИЕ МЕТОДИКИ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КИН, ПРЕДСТАВЛЕННОГО ЧЕРЕЗ АМПЛИТУДУ СМЕЩЕНИЙ ДЛЯ СЛУЧАЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО НАГРУЖЕНИЯ. РАСЧЕТ ПОПРАВОЧНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ В ОПРЕДЕЛЕННОМ ДЛЯ ВЧН ВЫРАЖЕНИИ КИН

Ткаченко В. Г., Зинин А. С.

Научный руководитель – к.т.н. Никитин А. Д.

МАИ, Институт №11, Кафедра физики конструкционных материалов

E-mail: tkvalent@mail.ru

В авиационной, машиностроительной, нефтегазовой и во многих других областях определенные части / элементы конструкций испытывают циклические нагрузки. В частности, на лопатки ГТД действуют вибрационные нагрузки, связанные с нестационарностью набегающего потока, что приводит к неравномерному распределению напряжений на лопатках двигателя, в особенности, если тот имеет достаточную величину накопленных пластических деформаций, чтобы происходило зарождение, а в дальнейшем и развитие трещин. Необходимо учитывать не только специфику нагружения конструкции, но и физические свойства материала, из которого то или иное изделие изготовлено, а также геометрические размеры элементов исследуемых конструкций.

Одним из таких основных кинематических характеристик в механике разрушения является КИН, определяющий распределение напряжений по фронту развития трещины. Выражение для КИН при статическом нагружении однозначно определено и включает в себя действующие на образец постоянные напряжения и длину трещины.

Однако в случае теоретической оценки величины КИН для случая ВЧН требуется его переопределение, поскольку параметром нагружения для случая высокочастотной нагрузки будет являться не прикладываемые статические напряжения, а задаваемая амплитуда смещений. Тогда, производя замену указанных параметров нагружения в формуле КИН для статической нагрузки, требуется сохранить размерность кинематической характеристики, $\text{Па} \cdot \text{м}^{1/2}$.

В настоящей работе произведен анализ размерностей для КИН, при его определении через амплитуду смещения в случае ВЧН и получена формула для КИН при указанном режиме нагружения, которая учитывает также влияние роста трещины на значения собственных частот исследуемого образца – понижение собственных частот колебаний конструкции с развитием в ней трещины следует также учитывать, поскольку ВЧН производится путем формирования в образце упругой стоячей волны, частота которой должна совпадать с собственной частотой рассматриваемого образца.

Конечная формула для теоретического расчета КИН через амплитуду смещений в случае ВЧН включает в себя неизвестную безразмерную геометрическую функцию, зависящую от отношения длины трещины к ширине образца. В работе сформулированы методики численного расчета КИН для случая ВЧН, а также приведены результаты такого расчета.

По найденным значениям КИН для каждой длины трещины (от 1 мм до 6 мм с шагом 0.5мм) определены значения неизвестной геометрической функции, упомянутой выше. Дана конечная теоретическая формулировка, однозначно определяющая КИН через амплитуду смещений для случая ВЧН.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИНЫ СНИЖЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ПРОВЕДЕНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ НАПРАВЛЕННЫХ НА ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СОБРАННЫХ УЗЛОВ КОМПРЕССОРА

Тюрин А. В.

Научный руководитель – профессор, д.т.н. Галимов Э. Р.
КНИТУ-КАИ, Факультет авиации, наземного транспорта и энергетики, Кафедра
материаловедения, сварки и производственной безопасности
E-mail: kai.tyurin@gmail.com

Изучение технологического процесса изготовления лопаток показало:

а) Лопатки направляющего аппарата представленных для исследования ступеней изготавливаются по типовому технологическому процессу.

б) Обработка профиля пера, гидродробеструйная обработка и виброгалтовка приводят к деформациям (прогибу и развороту пера и полок) вследствие перераспределения напряжений в поверхностных слоях лопаток, что, в конечном итоге, ведет к снижению точности положения базовых поверхностей лопаток.

в) Выбор технологической базы связан с необходимостью повышения точности изготовления пера лопатки.

г) Для снижения погрешности, связанной со сменой баз, производится фрезеровка (пропыление) площадки.

д) Поверхность верхней полки, которая используется при сборке узла не дорабатывается, что может вносить дополнительную погрешность.

е) Контроль лопаток контролерами БТК проводится на приборах, используемых при доводке профиля, что увеличивает погрешности измерения.

Изучение технологического процесса сборки узлов направляющих аппаратов показало:

а) Сборка направляющих аппаратов производится в специальном приспособлении секциями по 10 - 12 лопаток;

б) Конструктивно чертежом допускается зазор между полками лопаток до 0,1 (и до 0,15 для 20% лопаток) однако, в связи со сложностью обеспечения гарантированного зазора между полками лопатки при сборке практически набираются плотно. При этом наблюдается образование углового зазора (касание полок в одной точке) из-за наличия конусности полок.

в) При постановке промежуточных лопаток между секциями технологически разрешается доработка их по толщине полок до 1 мм (по 0,5 мм с каждой стороны).

г) Имеющиеся в металле приспособления для доработки полок не обеспечивают требуемых условий выполнения операции. Недостатки приспособлений: нестабильность зажимного усилия и неудачный выбор точки зажима, вызывающие значительные по величине прогибы пера; невозможность фрезеровки полок со стороны спинки лопатки;

д) Отсутствуют специальные измерительные приборы для определения требуемой толщины полок промежуточных лопаток.

Анализ размеров и допускаемых отклонений лопаток и узлов направляющего аппарата показал:

а) Номинальное значение угла установки лопатки - замыкающий размер угловой размерной цепи - равно сумме номинальных значений составляющих угловых размеров.

б) Имеет место смещение середины поля допуска на угол закрутки лопатки относительно середины поля допуска на угол установки лопатки в сборе.

Выводы и рекомендации:

1. В процессе сборки направляющих аппаратов представленных для исследования ступеней происходит значительный разворот пера и полок лопаток;

2. Основной причиной разворота является увеличенной против расчетной средняя толщина полок комплекта лопаток.

3. Причиной разворота является также нестабильные условия сборки лопаток, вызывающие различную величину разворота по секторам; погрешность положения полки относительно площадки (погрешность от смены баз) и погрешность положения лопатки в радиальном направлении.

4. Подтвержден вывод, что клепка лопаток к лабиринту по сравнению со сборкой болта незначительно меняет качество направляющего аппарата;

5. Подтвержден вывод, что токарная обработка полков разворачивает комплект лопаток в сторону уменьшения угла;

6. Вероятной причиной изменения угла установки является разворот полков лопаток под действием сил резания при токарной обработке с попаданием стружки и заусенцев между действием сил резания при токарной обработке с попаданием стружки и заусенцев между полками; это оказывает то же действие, что и увеличение толщины верхней полки.

Для повышения точности направляющих аппаратов по углу установки рекомендуется:

1. Произвести корректировку технологического процесса изготовления лопаток;

2. Спроектировать, изготовить и внедрить в производство рабочие приспособления для доработки полков промежуточных лопаток при сборке направляющих аппаратов предположенных ступеней.

3. Спроектировать, изготовить и внедрить измерительные приборы для определения требуемой толщины промежуточных лопаток при сборке направляющих аппаратов промежуточных ступеней;

4. Спроектировать и наготовить технологический лабиринт для сборки направляющих аппаратов последней ступени.

Для дальнейшего повышения точности направляющих аппаратов по углу установки до необходимо продолжить исследовательскую работу в следующих направлениях: повышение стабильности процесса сборки направляющих аппаратов с целью уменьшения неравномерной плотности лопаток при сборке, влияющей на разворот лопаток; теоретического определения и экспериментальной проверки допустимых отклонений лопаток по углу закрутки, толщине и конусности полков, обеспечивающих требуемое качество углов направляющих аппаратов; определение причин разворота лопаток при токарной обработке полков и испытаниях двигателя; изучение влияния метода токарной обработки узла на изменение углов установки.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ИДЕАЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ СРЕД К ДИЗАЙНУ ПРОЦЕССА ПЛОСКОЙ ЭКСТРУЗИИ

Фадеев Е. П.^{1,2}, Идрисов Д. М.^{1,3}

Научный руководитель – доцент, к.ф.-м.н. Лямина Е. А.

¹ ИПМех РАН

² МГТУ им. Н. Э. Баумана, ³ МФТИ

E-mail: fadeevgor@yandex.ru

Теория идеального течения применима для описания пластического деформирования металлов, для которых справедлив критерий текучести Треска, не учитывающий влияние величины среднего напряжения, и ассоциированный закон течения. В случае стационарного идеального пластического деформирования, система уравнений, описывающая процесс, включает дополнительное требование, предполагающее, что линии тока всюду совпадают с направлениями наибольших напряжений. Существование решения и его единственность доказаны. Теория идеального течения позволяет получить наиболее равномерное распределение деформаций в конечном продукте. Получены решения для процесса экструзии листового материала.

В работе рассматривается модель двойного сдвига. Эта модель основана на условии текучести Кулона-Мора, которое учитывает влияние среднего напряжения. Ранее показано существование решения для стационарной плоской модели идеального течения сыпучих сред.

Теория идеальных течений применена к дизайну матрицы для плоско-деформированного процесса экструзии/ волочения. Получен идеальный профиль матрицы, соответствующий различным параметрам материала для процесса экструзии/ волочения пластических материалов, описываемых моделью двойного сдвига. Решение получено методом, основанным на существовании характеристик для модели двойного сдвига. Проведено сравнения с известным решением, полученным для модели Треска. Показано, что угол внутреннего трения влияет на форму идеальной матрицы. В частности, длина идеальной матрицы для чувствительного к среднему напряжению материалу, оказывается меньше, чем для материала, критерий текучести которого не зависит от среднего напряжения.

Рассматривается модель, в которой напряженное состояние плоской экструзии гранулированной несжимаемой среды, в случае плоской деформации, для любой криволинейной ортогональной системы координат (μ, ν) , описывается условием текучести Кулона-Мора

$$(\sigma_{\mu\mu} + \sigma_{\nu\nu}) \sin \phi + \sqrt{(\sigma_{\mu\mu} - \sigma_{\nu\nu})^2 + 4\tau_{\mu\nu}^2} = 2k \cos \phi,$$

уравнением несжимаемости и ассоциированным законом течения

$$\varepsilon_{\mu\mu} + \varepsilon_{\nu\nu} = 0, \quad \sin 2\psi (\varepsilon_{\mu\mu} - \varepsilon_{\nu\nu}) - 2 \cos 2\psi \varepsilon_{\mu\nu} - 2 \omega_{\mu\nu} \sin \phi = 0.$$

Здесь $\sigma_{\mu\mu}, \sigma_{\nu\nu}, \tau_{\mu\nu}$ — компоненты тензора напряжений, $\varepsilon_{\mu\mu}, \varepsilon_{\nu\nu}, \varepsilon_{\mu\nu}$ — компоненты тензора деформации, k — предел текучести, ϕ — угол внутреннего трения, $\omega_{\mu\nu}$ — единственная ненулевая компонента вращения в координатах (μ, ν) , а угол ψ — измеренный в противоположном направлении к направлению часовой стрелки, угол отклонения главной оси напряжения от μ -направления.

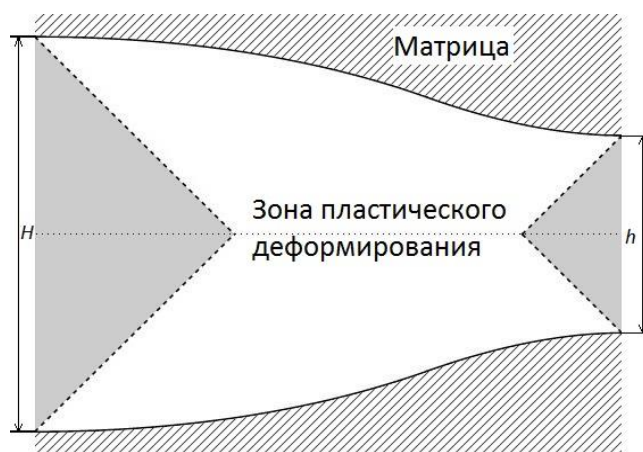


Рис. 1. Плоская экструзия

На входе в матрицу лист имеет толщину H , а на выходе толщину h (рис. 1). Матрица (заштрихованная область на рисунке 1), изготовлена из жесткого материала и поверхность контакта является идеально гладкой. Рассматривается стационарный процесс, который является плоско-деформированным и симметричным.

Найдена идеальная форма профиля матрицы, с применением теории идеальных течений, которая основывается на предположении, что направление линии тока всюду совпадает с главной осью тензора напряжений, соответствующей наибольшему главному значению напряжений. Материал в области, отмеченной серым цветом на рисунке 1, является жестким, а в «белой» области деформируется пластически. Решение получено методом, основанным на методе характеристик. Величины входной и выходной толщин листа были приняты равными 2 и 1 соответственно.

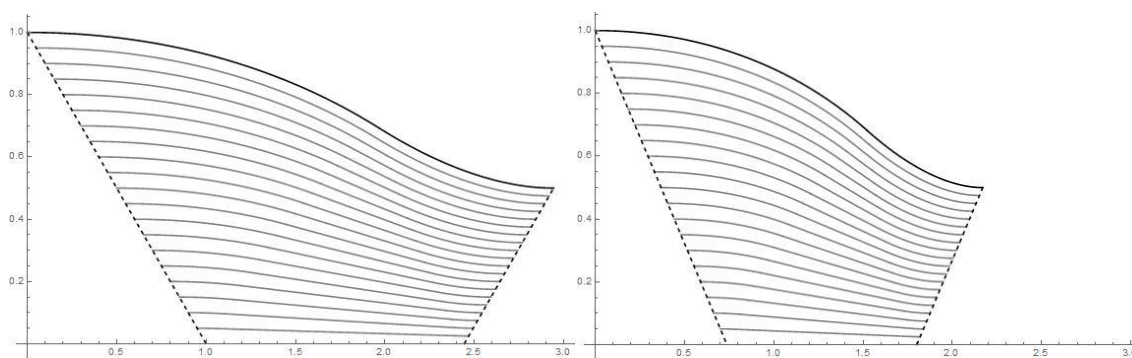


Рис. 2. Поля линий скольжений ($\phi = 0$ слева и $\phi = 0.3$ справа).

На рисунке 2 изображены поля линий скольжения в зоне пластического деформирования при различных значениях угла внутреннего трения. При этом форма профиля матрицы совпадает с одной из линий тока.

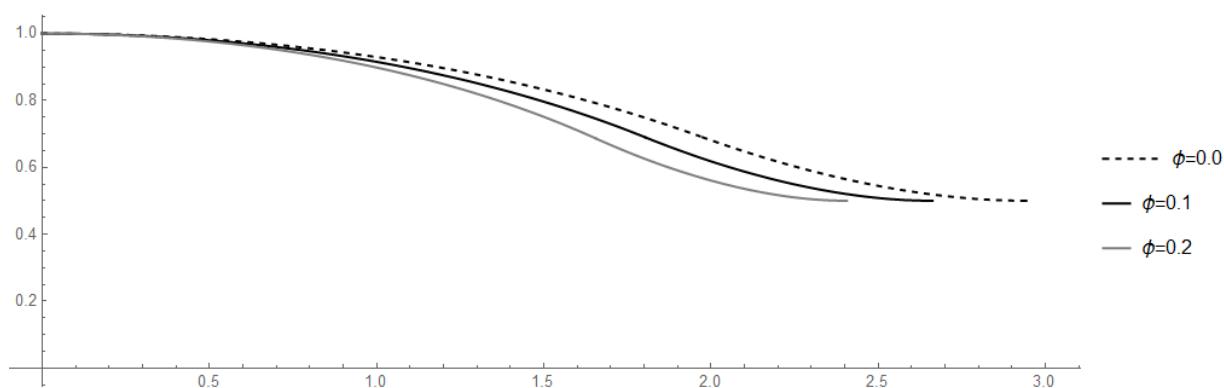


Рис. 3. Формы профиля матрицы при различных значениях угла внутреннего трения.

На рисунке 3 приведены формы профиля матрицы при различных значениях угла внутреннего трения. На рисунке 4 приведена зависимость величины усилия, приложенного на входе в матрицу, отнесенного к пределу текучести, в зависимости от величины угла внутреннего трения.

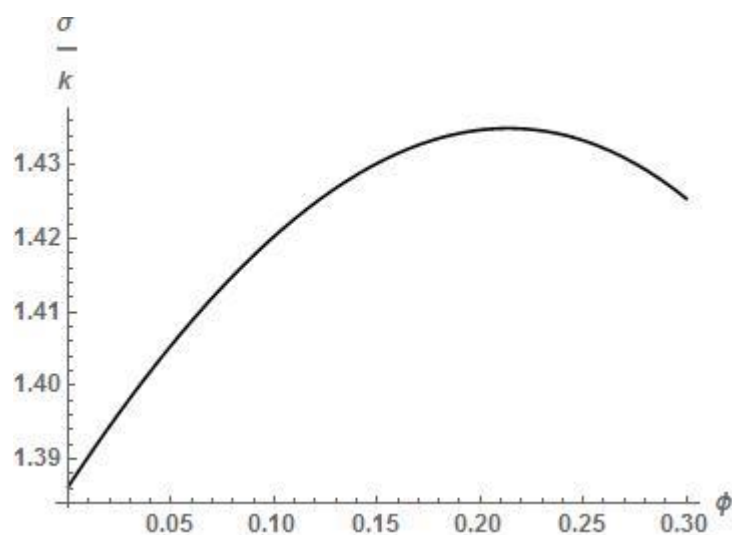


Рис. 4. Зависимость силы, толкающей лист материала, от угла внутреннего трения.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований проект № 18-51-54002.

РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАТЕРИАЛАХ СО СЛОЖНОЙ РЕОЛОГИЕЙ

Федоренко Р. В., Кудрявцев А. А.

Научный руководитель – член-корреспондент, д.ф.-м.н. Индейцев Д. А.

СПбПУ, ИПМиМ, Кафедра механики и процессов управления

E-mail: fedorenko_rv@spbstu.ru

Динамические задачи, описывающие механические процессы в одном из компонентов в материалах со сложной реологией, очень актуальны. В таких материалах процессы в одном из компонентов сопровождаются релаксационными процессами, приводящих к значительным изменениям в структуре других компонентов [1,2]. В экспериментах такие трансформации обычно сопровождаются добавочной слабой релаксацией, характеризующейся откликом с низкочастотным спектром.

Эта задача появляется, когда происходит лазерное облучение мультикомпонентных материалов. Среди таких материалов, особый класс представляют проводники (металлы, полупроводники). В дополнение к динамическим процессам в решетке, параллельно возбуждаются кинематические процессы в электронном газе. Взаимодействие электронов и решетки приводит к необходимости рассмотрения процессов в обеих подсистемах проводников одновременно.

Такой подход становится особенно важным в изучении динамических процессов под действием излучения лазера. В данном случае, энергия излучения лазера, как правило, в первую очередь передается подсистеме электронного газа и затем передается на решетку уже только как результат внутренних взаимодействий. При рассмотрении быстротекущих процессов (фемто-пикосекундного уровня) требуется уже рассмотрение двухтемпературной модели, в которой температуры электронного газа и решетки имеют разные значения [3].

В данном случае классические связанные уравнения термоупругости, учитывающие прогрев материала вследствие лазерного воздействия только с помощью тепловых и термоупругих процессов в решетке, в недостаточной степени описывают формирование акустической волны. Из-за данного эффекта в данной статье изучена проблема влияния динамических процессов в электронном газе на деформационные процессы в решетке. Показано, что учет наличия в системе электронного газа может привести к качественным изменениям деформационных процессов в проводниках. В частности, значительно увеличивается время релаксации в сравнении с динамическими процессами, которые учитывают только решетку в материале.

Разработка современных методов диагностики дефектов в материалах (прежде всего в металлах) существенно зависит от физики деформационных процессов в решетке. Разработка таких методов наиболее важна для акустических методов диагностики, которые основаны на записи деформационных процессов в решетке материала. Поэтому задача описания формирования динамического отклика в решетке проводников с возможностью возбуждения электронного газа является принципиально новой фундаментальной задачей.

Впервые разработана физическая модель, которая учитывает воздействие нагретого электронного газа на динамику кристаллической решетки не только через тепловое расширение решетки, но и через дополнительную реакцию, вызванную подвижностью электронов. В этом случае изучаются эффекты возбуждения электронного газа и эффекты электронного сопротивления из-за движения теплового фронта, учитывая взаимодействие с решеткой материала.

В сущности, классическая термоупругость дополняется соотношениями, которые учитывают динамику электронов, как и составляющие их параметры [4]. В основе предлагаемой модели, рассматриваются особенности деформационных процессов около созданных дефектов проводников, подвергнутых лазерному воздействию.

Предлагаемая модель запрограммирована в конечно-элементной системе и протестирована в сравнении с экспериментальными данными. В частности, экспериментальная информация по ультразвуковой диагностики металлов, идентифицированных

по методу Виккерса и Роквелла, представлена в источниках [5-7].

Литература

1. D. A. Indeitsev, Yu. I. Meshcheryakov, A. Yu. Kuchmin, D. S. Vavilov, Multi-scale model of steady-wave shock in medium with relaxation, *Acta Mechanica*, 2015, V.226, No. 3, pp.917-930.
2. Indeitsev D. A., Skubov D. Y., Vavilov D. S. Problems of Describing Phase Transitions in Solids //Mechanics and Model-Based Control of Advanced Engineering Systems. – Springer Vienna, 2014, – pp. 181-188.
3. L. Jiang, H.L. Tsai, , Improved Two-Temperature Model and its Application in Ultrashort Laser Heating of Metal Films, *J. of Heat Transfer*, 2005, V.127, No. 10, pp.1167-1173.
4. D.Y. Tzou, J.K. Chen, J.E. Beram, Recent Development of Ultrafast Thermoelasticity, *J. of Thermal Stresses*, 2005,V.28, No. 6-7, pp.563-594.
5. A.L. Glazov, N.F. Morozov, K.L. Muratkov, The Effect of External Stresses on the Behavior of Photoacoustic Signals Inside Vickers Indenter Marks on a Steel Surface, *Tech. Phys. Lett.*, 2016, Vol. 42, No. 1, pp. 67–70.
6. A.L. Glazov, N.F. Morozov, K.L. Muratkov, Variations of Photoacoustic Signals within the Vickers Indent in Metals under External Stresses by the Examples of Steel and Nanocopper, *Physics of the Solid State*, 2016, Vol. 58, No. 9, pp. 1735–1743.
7. A.L. Glazov, N.F. Morozov, K.L. Muratkov, Photoacoustic Microscopy of Vickers Indentations in Metals with Piezoelectric Detection, *Int. J. Thermophys.* 2017, V.38, No.7, pp.113-1-113-13.

ИЗУЧЕНИЕ ЗАРОЖДЕНИЯ ДИСЛОКАЦИЙ НА ГРАНИЦЕ ЗЕРНА В ГЦК ПОЛИКРИСТАЛЛАХ

Фомин Е. В.

Научный руководитель – д.ф.-м.н. Майер А. Е.
ЧелГУ, Физический факультет, Кафедра теоретической физики
E-mail: fomin33312@gmail.com

В данной работе исследуется зарождение дислокаций на границе зерна (ГЗ) в кристаллах алюминия под действием сдвиговой деформации. Для моделирования процесса деформации применяется метод молекулярной динамики с помощью программного пакета LAMMPS[1], где межатомное взаимодействие задается потенциалом EAM (embedded atom model)[2]. В качестве образцов взяты 12 бикристаллов (2.25° - 40.316°) с симметричным углом наклона зерен и 1 монокристалл, кристаллографические направления всех образцов [100] [-110] [001]. Кристаллы содержат от 503520 до 523520 атомов. В исследовании, бикристаллы построены при помощи метода диаграмм Вороного в программном пакете atomsk[3].

Анализ результатов моделирования показывает, что существует 3 типа ГЗ в данном диапазоне углов разориентировки. Первый тип – типичная малоугловая граница зерна, состоящая из периодически расположенных полных дислокаций. Второй тип (среднеугловая ГЗ) можно представить как сплетение дислокаций (из-за сложной структуры ее точно нельзя охарактеризовать как остальные 2 типа). Третий тип – высокоугловая ГЗ, состоящая из периодически расположенных дислокаций Франка. Кроме этого, из полученных данных выделено изменение систем скольжения дислокаций (исходящих с ГЗ) с ростом угла разориентировки.

Для каждого типа ГЗ можно выделить характерные свойства, проявляющиеся во время пластической деформации. К примеру, зарождение дислокаций – в 1 и 3 типе дислокации с границы распространяются в зерна за счет реакций расщепления (например, полная дислокация → дислокация Франка + дислокация Шокли), а во 2 случае происходит излучение растянутых частичных дислокаций с границы без видимых изменений ГЗ. Также, зависимость между углом наклона зерен и плотностью дислокаций имеет немонотонный характер и зависит от структуры ГЗ. Впрочем, проявляется корреляция между касательным напряжением и плотностью дислокаций, что указывает на явную связь приложенных напряжений и зарождения дислокаций на ГЗ.

Суммируя, можно сделать вывод, что возможно описание связи зарождения дислокаций и приложенных напряжений, но нужно учитывать тип ГЗ, энергию границы, изменение систем скольжения и реакции расщепления дислокаций на границе, если они есть (1 и 2 тип ГЗ). Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания 3.2510.2017/ПЧ.

Литература

1. Plimpton S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics // J. Comp. Phys. 1995, V. 117, P. 1-19.
2. Mishin Y., Farkas D., Mehl M.J., and Papaconstantopoulos D.A. Interatomic potentials for monoatomic metals from experimental data and ab initio calculations // Phys. Rev. B 1999, V. 59, P. 3393.
3. Pierre Hirel, Atomsk: A tool for manipulating and converting atomic data files // Comput. Phys. Comm. 2015, V.197, P.212-219.

МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НЕУСТОЙЧИВОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Чечулина Е.А.

Научный руководитель – профессор, д.ф.-м.н., Трусов П.В.
ПНИПУ

E-mail: zhenya-chechulina@yandex.ru

Неустойчивое пластическое течение и локализация пластической деформации (деформационные полосы) в реальных материалах давно привлекают внимание ученых, поскольку эффекты локализации играют чрезвычайно важную роль в практике, приводя к существенному изменению механических свойств обрабатываемых деталей, понижению коррозионной стойкости и, следовательно, к изменению сроков службы и качества изделий. Главной задачей теоретического и экспериментального исследования неустойчивого пластического деформирования является создание адекватных моделей, объясняющих процессы локализации деформации в материалах под нагрузкой.

Пластическое течение твердых тел, обусловленное движением и размножением дислокаций и других дефектов, по своей природе не является однородным и непрерывным. Однородное пластическое течение может стать неустойчивым в пространстве и/или времени, что проявляется в формировании дислокационных структур, локализации деформации и сложной временной эволюции напряжения пластического течения или скачкообразной деформации – эффекте Портевена – Ле Шателье (ПЛШ).

Лидирующим механизмом, ответственным за проявление эффекта ПЛШ, полагается динамическое деформационное старение, обусловленное взаимодействием между дислокациями, временно остановившимися на препятствиях (дислокациях леса или других дефектах), и диффундирующими атомами примеси, которые дополнительно закрепляют дислокации.

Для описания механизмов пластического деформирования и разрушения материалов необходимо использовать физические подходы на микромасштабном уровне. В работе предлагается трехуровневая математическая модель, предназначенная для описания неустойчивого пластического деформирования в поликристаллических материалах при термомеханическом нагружении, в частности – эффекта Портевена – Ле Шателье. Основным механизмом данного эффекта считается закрепление дислокаций атомами примесей при остановках на барьерах различной природы. При построении модели применяется многоуровневый подход, основанный на использовании в ее структуре внутренних переменных – параметров, характеризующих состояние и эволюцию мезо- и микроструктуры материала.

Подход к описанию дислокационной структуры основан на введении однородных плотностей дислокаций на каждой системе скольжения и получении эволюционных уравнений, описывающих механизмы их зарождения и взаимодействия.

Для учета наиболее важных термически активируемых механизмов деформирования в работе вводятся соответствующие кинетические уравнения. Текущее состояние микроструктуры отслеживается через плотности дислокаций, которые служат внутренними переменными мезоуровня. Эволюция плотности дислокаций связана с конкуренцией процессов генерации и аннигиляции дислокаций различного вида. Плотность дислокаций для каждой системы скольжения кристаллита полагается однородной и зависящей от времени.

Разработанный подход позволяет получить количественные характеристики эволюции параметров микроструктуры в зависимости от степени деформации, выявить их влияние на макроскопические параметры.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-48-590158 p_a).

ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО СЛОЯ МЕЖДУ ЖЕСТКИМИ ЦИЛИНДРАМИ

Шабайкин Р. Р.

Научный руководитель – профессор, д.ф.-м.н. Георгиевский Д. В.
МГУ, Механико-математический факультет, Кафедра теории упругости
E-mail: ravi11@live.ru

Рассмотрено течение тонкого идеальнопластичного несжимаемого слоя конечной длины между сближающимися цилиндрами, где внешний цилиндр неподвижен, а внутренний расширяется с постоянной скоростью. Пластический слой в данном процессе выдавливается в стороны и течёт от плоскости симметрии перпендикулярной оси цилиндров к свободным границам слоя. На поверхностях контакта при этом возникают касательные напряжения. Отыскание решения проводится методом асимптотического интегрирования, в ходе которого возникает 2 безразмерных параметра, один из которых связан с динамическими слагаемыми и равен обратному числу Эйлера, а другой является естественным малым геометрическим параметром, равным отношению толщины слоя к половине его длины. Эти величины принимаются малыми.

Метод заключается в разложении неизвестных функций в системе уравнений пластичности по степеням малого геометрического параметра и последовательного приравнивания коэффициентов при одинаковых степенях правых и левых частей уравнений.

Из анализа уравнений движения получен критерий, позволяющий различать квазистатическую стадию сжатия и динамическую.

Найдены главные члены асимптотик для 2 режимов сдвливания и проведено качественное сравнение с квазистатическим решением: показано изменение эпюры давления с линейной на квадратичную, что говорит об увеличении суммарной силы действующей на поверхность. Данные решения справедливы вдали от плоскости симметрии перпендикулярной оси цилиндров и свободных границ слоя, где необходимо строить другие разложения.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В НЕЛИНЕЙНОМ ДВУМЕРНОМ КРИСТАЛЛЕ С ТРЕУГОЛЬНОЙ РЕШЕТКОЙ

Шварёв Н.Г., Старобинский Е.Б.

Научный руководитель – доцент, к.ф.-м.н. Кузькин В.А.

СПбПУ

E-mail: megameow@mail.ru

Исследуется процесс перераспределения тепловой энергии по пространственным направлениям в нелинейном кристалле как функция амплитуд случайных начальных скоростей (температур) частиц. Процесс представляется как наложение медленного процесса на быстрый, приводится их аппроксимация и формула подобия для разных амплитуд.

В связи с развитием нанотехнологий количественное описание неравновесных тепловых процессов в кристаллах является одной из актуальных проблем современной механики и физики твердого тела. Большой интерес представляют процессы, происходящие в телах при переходе к состоянию термодинамического равновесия. При возникновении неравновесного состояния кинетические энергии теплового движения атомов в разных направлениях могут значительно различаться, вследствие чего кинетическая температура проявляет тензорные свойства [1].

В данной работе рассматривается двумерная плотноупакованная треугольная кристаллическая решетка, ближайшие частицы в которой взаимодействуют посредством потенциала Леннарда-Джонса. Ячейка периодичности содержит миллион частиц. Начальные перемещения частиц равны нулю. Начальные скорости частиц – независимые случайные векторы с нулевым математическим ожиданием в пределах заданной амплитуды. Для успешной фильтрации теплового шума при вычислении энергии требуется, чтобы система состояла как минимум из нескольких миллионов частиц. При проведении расчетов математическое ожидание заменено на усреднение по ансамблю из 100 реализаций, то есть исследуемая усредненная ячейка с точки зрения статистических характеристик эквивалентна ячейке из 100 миллионов частиц.

В качестве величины, характеризующей распределение кинетической энергии (температуры) по пространственным направлениям, используется обезразмеренная разность температур θ , соответствующих движению частиц по взаимно перпендикулярным осям:

$$\theta = (T_{xx} - T_{yy}) / (T_{xx}^0 - T_{yy}^0), \quad k_B T_{xx} = m \langle v_x^2 \rangle, \quad k_B T_{yy} = m \langle v_y^2 \rangle, \quad (1)$$

где T_{xx}^0 , T_{yy}^0 – начальные значения компонент тензора температуры, k_B – постоянная Больцмана.

Чтобы исследовать влияние нелинейности на процесс перераспределения кинетической энергии по направлениям, была проведена серия расчетов с различными значениями амплитуды начальных скоростей. Было получено, что на временах порядка нескольких периодов осцилляции величина θ совершает высокочастотные колебания, описываемые гармонической моделью [2]. На больших временах на высокочастотные колебания накладывается медленный процесс, связанный с наличием нелинейности, приводящий к тому, что система стремится к равному распределению энергии по пространственным направлениям (θ стремится к нулю). Скорость данного процесса зависит от величины начальной температуры системы. Чем она больше, тем быстрее система стремится к равному распределению энергии по пространственным направлениям. При этом на больших временах изменение начальной температуры соответствует изменению масштаба по времени функции θ по следующему закону подобия:

$$\theta_1(t) = \theta_2(t * T_1/T_2), \quad (2)$$

где T_1 и T_2 – значения начальной температуры системы. Результат применения данного закона для серии расчетов с разными начальными амплитудами скоростей приведен на рисунке 1.

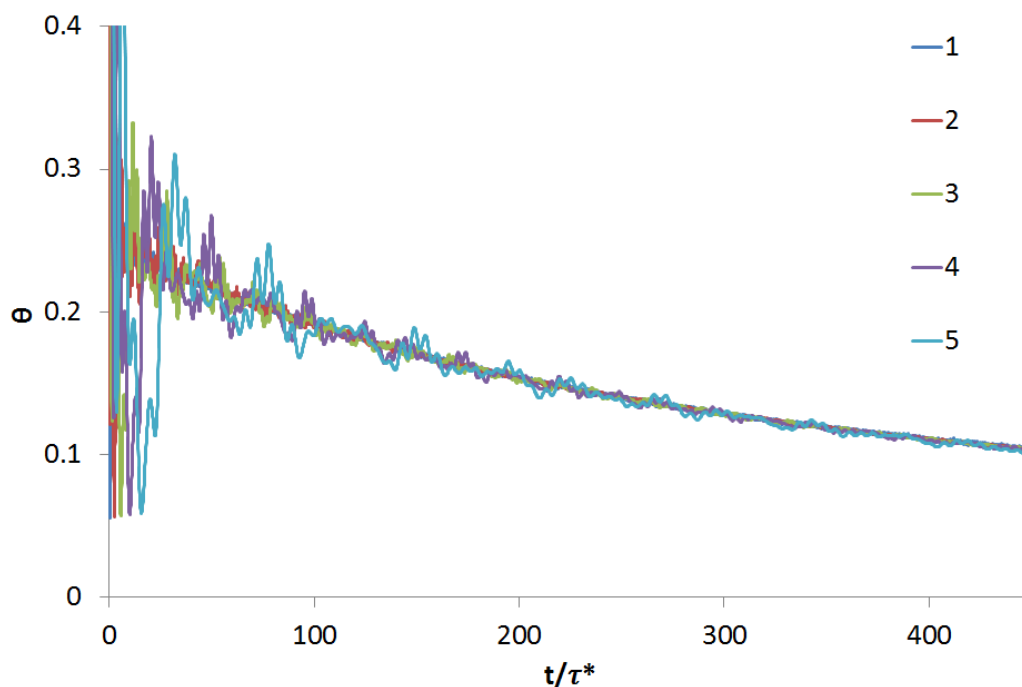


Рис.1. Перераспределение кинетической энергии (температуры) по пространственным направлениям при разных амплитудах начальных скоростей (1 – $0.01v_*$, 2 – $0.02v_*$, 3 – $0.03v_*$, 4 – $0.04v_*$, 5 – $0.05v_*$). Здесь $v_* = 2\pi\sqrt{m/C}$, C – жесткость связи, m – масса частицы. Кривые 2 – 5 отмасштабированы с учетом формулы подобия и наложены на кривую 1

Быстрый процесс, на который наложилась нелинейность, является произведением быстрого процесса и чисто медленного, поскольку быстрый процесс, соответствующий гармонической модели, при окончании высокочастотных колебаний через несколько периодов осцилляции аппроксимируется прямой $\theta = 1/4$, а выделенный чисто медленный процесс, связанный с наличием нелинейности, имеет аппроксимацию степенной функцией времени с неотрицательными параметрами вида $1/(a + b * t^c)$, также подчиняющейся закону подобия. Нетрудно показать, что применение закона подобия позволяет положить $a = 4$, при этом параметр b является обратной функцией скорости процесса с нижним пределом в нуле, параметр c обеспечивает связь скорости процесса и нелинейности.

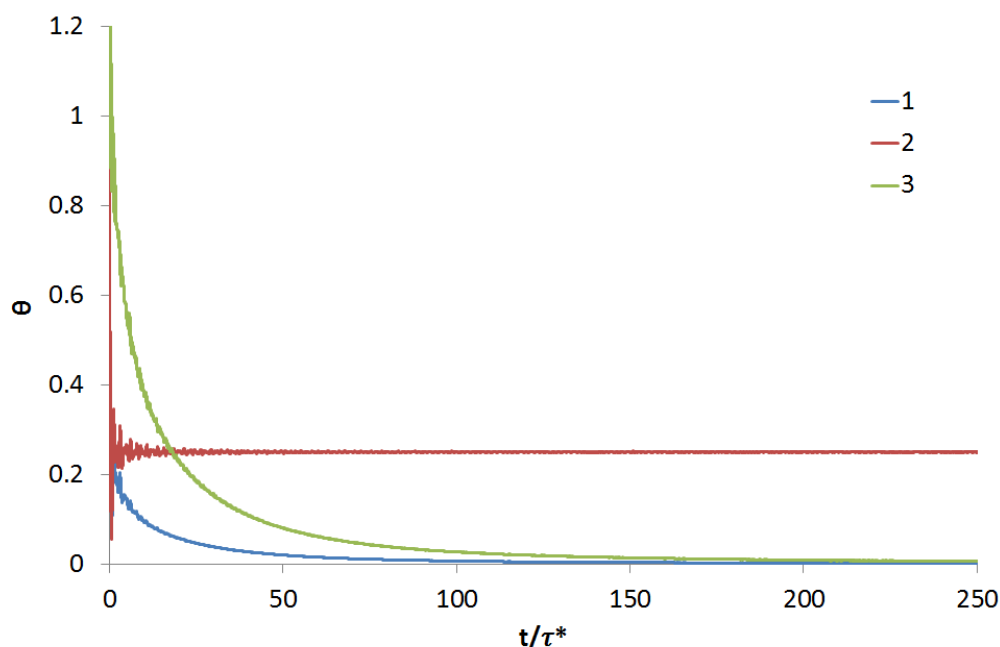


Рис.2. Выделение медленного процесса (1 – быстрый процесс с наложенной на него нелинейностью, 2 – быстрый процесс, 3 – выделенный медленный процесс)

Таким образом, было получено, что нелинейный идеальный кристалл с треугольной решеткой стремится к равному распределению кинетической энергии по пространственным направлениям. Скорость данного переходного процесса зависит от величины начальной температуры системы. Влияние нелинейности сводится к изменению масштаба по времени функции, описывающий переходный процесс. Быстрый и медленный процесс могут быть успешно разделены, результат такого разделения приведен на рисунке 2.

Вычисления проводились с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра “Политехнический” Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Литература

1. B.L. Holian, W.G. Hoover, B. Moran, G.K. Straub, Shock-wave structure via nonequilibrium molecular dynamics and Navier-Stokes continuum mechanics. Phys. Rev. A, 22, 2798 (1980).
2. В.А. Кузькин, А.М. Кривцов. Аналитическое описание переходных тепловых процессов в гармонических кристаллах. Физика твердого тела, том 59, вып. 5, 1023-1034 (2017).

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ПРОШИВКИ ПАТРУБКОВ С НАКЛОННЫМ ФЛАНЦЕМ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ВЕРХНИХ ОЦЕНОК

Шелест Д.О.

Научный руководитель – профессор, д.т.н. Черняев А.В.

ТулГУ, Политехнический институт, Кафедра МПФ

E-mail: abanosimoff2018@yandex.ru

Интенсивное развитие авиационной промышленности актуализирует задачи получения сложнопрофильных металлических деталей наиболее рациональными и эффективными методами обработки металлов. Патрубки с различными углами наклона фланца имеют широкое применение в авиастроении. Наиболее технологичными и производительными операциями для получения изделий подобной конфигурации являются операции с использованием обработки металлов давлением (ОМД). В частности, схема, сочетающая в себе пробивку, формовку, вытяжку и выдавливание цилиндрической стенки патрубка.

На стадии обратного выдавливания, т.е. формирования цилиндрической стенки патрубка и калибровки внутреннего отверстия посредством выбора диаметра прошивного пуансона, имеется ряд особенностей, учитывая которые, можно существенно оптимизировать технологический процесс изотермической прошивки патрубков с наклонным фланцем. Для оценки степени влияния геометрических и скоростно-силовых параметров прошивки необходимо создать математическую модель прошивки патрубка с заданными параметрами, построить графические зависимости, а также найти оптимумы.

Наиболее предпочтительным для создания математической модели выдавливания на наш взгляд является метод верхней оценки. Он отличается сравнительной простотой решения, а также достаточной точностью получаемых зависимостей, что позволяет нам решать различные задачи по оптимизации технологических процессов обработки металлов давлением. В работе при помощи решения полученного с применением метода верхних оценок были найдены закономерности изменения силовых параметров и повреждаемости заготовки от геометрических, скоростно-силовых и других факторов, на основе этих уравнений построены графические зависимости (в программном комплексе MathCAD). Выявлены оптимальные скорости движения инструмента и геометрические параметры, в первую очередь угол конусности прошивного пуансона и редукция, т.е. изменение диаметров до и после прошивки. Установлен оптимальный диапазон угла конусности пуансона, который составляет от 7 до 16 градусов.

Дальнейшая работа будет направлена на систематизацию полученных данных. На данный момент осуществляется анализ повреждаемости заготовки в процессе прошивки патрубков.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ С ОПТИМАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ МАГНИТНО-ЖИДКОСТНЫХ УПЛОТНИТЕЛЕЙ

Шешенин М. А.

Научный руководитель – Столяров И. В.

ГБПОУ СПТ им. Б.Г.Музрукова, Факультет технологии машиностроения, Кафедра специальных дисциплин

E-mail: msheshenin@inbox.ru

В данной работе рассмотрены механические и химические способы получения магнитных жидкостей, исследованы физико-химические способы получения магнитных жидкостей с оптимальными свойствами: стабильностью или увеличением значения магнитной индукции в жидкости при наличии внешнего магнитного поля с увеличением температуры.

Практическая ценность работы – разработан технологический процесс синтеза магнитной жидкости на водной основе с объемной концентрацией твердой фазы (сТ) 4%, которая может быть применена в магнитножидкостных уплотнителях, работающих в неоднородном магнитном поле при температурных нагрузках в пределах от 300С до 1000, которые могут быть использованы в авиационной и ракетно-космической технике.

Выбор данной жидкости определяется оптимальным характером изменения магнитной индукции (в сравнении с другими магнитными жидкостями на водной основе с объемной концентрацией твердой фазы сТ 2%, 6% и 8% и промышленной магнитной жидкостью на основе керосина). После диспергирования на ультразвуковом диспергаторе были также исследованы размеры частиц порошка в жидкости и был произведен нагрев жидкостей до 1000С с последующим повторным исследованием размеров частиц.

Данное исследование также подтвердило выбор магнитной жидкости на водной основе с сТ=4%.

Для выявления «оптимальной» жидкости был применен стандартный метод конденсации при осаждении магнетита щелочью из водных растворов солей двух- и трехвалентного железа с нашими изменениями. Были получены жидкости, отличающиеся не только размером частиц, но также их объемной концентрацией (сТ 2%, 4%, 6% и 8%).

Для сравнения была использована промышленная магнитная жидкость на основе керосина с дисперсными магнетитовыми частицами и олеиновой кислотой в качестве стабилизатора с сТ=5%.

Все пробы магнитных жидкостей были подвергнуты металлографическому исследованию с целью измерения размеров частиц на оптическом микроскопе «Axiovert 200 MAT» при увеличении $\times 1000$ с помощью системы анализа изображений «ВидеоТесТ – Размер 5.0». Были исследованы размеры частиц в магнитных жидкостях в исходном состоянии и после нагрева жидкостей до 1000С. Было произведено диспергирование на ультразвуковом диспергаторе УЗНД – 2Т и исследованы размеры частиц порошка в жидкости, после чего был произведен нагрев жидкостей до 1000С и повторное исследование размеров частиц. Все проведенные исследования подтвердили правильность выбора магнитной жидкости с оптимальными свойствами для данной задачи с сТ=4%.

Составлен бизнес-план производства данной магнитной жидкости с объемной концентрацией твердой фазы 4% на базе производственных мощностей ГБПОУ СПТ им. Б.Г. Музрукова. Исходя из проведенного экономического исследования и анализа, можно сделать вывод, что данный проект является прибыльным, т.к. уровень рентабельности в течение одного года равен 54% при норме от 15 до 50%.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПРОВОЛОЧНОЙ ОСНОВЫ МАТЕРИАЛА МР ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА РАЗРЫВ

Шипунов В. В., Десюкевич К. Ю.

Научный руководитель – Давыдов Д. П.

Самарский университет, Институт двигателей и энергетических установок, Кафедра
конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов

E-mail: happyrampus3@gmail.com

В современной ракетно-космической технике широко применяются разнообразные изделия из материала МР (металлический аналог резины).

Материал МР представляет собой однородную упругопористую массу, получаемую холодным прессованием определённым способом уложенной, растянутой и дозированной по весу металлической проволоочной спирали. От упругопластических характеристик проволоки зависят свойства готовых деталей из МР.

Механические свойства проволоочной основы мало изучены. Знание этих свойств позволит изучить процессы навивки и прессования материала МР на принципиально новом уровне с применением современных средств компьютерного математического моделирования, таких как ANSYS и LS-DYNA.

Механические характеристики планируется исследовать путем проведения разрывных испытаний образцов проволоки с получением диаграмм растяжения в координатах «напряжение – деформация». Для этого предлагается использовать универсальную испытательную установку типа Galdabini Quasar 25. Для корректного закрепления проволоочных образцов в процессе испытаний были разработаны [1] специальные зажимы.

Следует отметить, что в настоящее время не существует датчиков, позволяющих измерять деформацию проволоочного образца на рабочем участке l_0 . Средства, применяемые для измерения деформации стандартных гладких цилиндрических образцов, такие, как подвесные экстензометры невозможно закрепить на образце в силу его низкой изгибной жёсткости. Использование тензорезисторов ограничено в связи с малыми диаметрами проволоки, применяемой для изготовления материала МР (0,05-0,3 мм). Решением проблемы может стать датчик измерения деформации, работа которого основана на оптоэлектронном методе. Суть метода заключается в связи выходного напряжения со световым потоком, падающим на датчик. Пример использования этого метода в целях автоматизированного контроля параметров проволоочной спирали в статье [2].

В настоящей работе впервые предлагается методика измерения деформаций проволоочной основы материала МР при испытаниях на разрыв. Проволока устанавливается между двумя зажимами, один из которых неподвижен, а второй перемещается вверх, вызывая её растяжение. На образце закреплены две пластины-флажка, определяющие его измерительную базу l_0 . Они смещаются при растяжении вместе с проволокой. Датчик деформации состоит из двух пар оптоэлектронных устройств, каждая из которых содержит фотодиод – источник инфракрасного излучения и фототранзистор (фотоэлемент) – приёмник излучения. Наличие двух датчиков, верхнего и нижнего, позволяет определять удлинение базы образца проволоки. В начальный момент времени оба флажка частично перекрывают фотоэлементы. По ходу испытания они смещаются вверх, перекрывая всё большую площадь фотоэлемента и уменьшая фотопоток. При снижении фотопотока падает напряжение на фототранзисторе. Для используемого типа датчика зависимость напряжения от фотопотока линейная, что значительно упрощает измерение величины деформации. Выполнив тарировку датчиков, можно напрямую связать напряжение на фототранзисторе с величиной удлинения проволоки:

$$y = k \Delta U,$$

где ΔU – изменение напряжения на фототранзисторе, y – величина смещения флажка, k – тарировочный коэффициент. Тогда относительную деформацию проволоочного образца можно представить в следующем виде:

$$\varepsilon = \Delta l / l_0 = (y_2 - y_1) / l_0 = (k(\Delta U_2 - [\Delta U]_1)) / l_0,$$

где Δl – удлинение базы l_0 , $[\Delta U]_1$, $[\Delta U]_2$ – изменение напряжения на фототранзисторах

при испытании, ε – относительная деформация проволочного образца.

Для разработки конструкции датчика деформации проволоки была выбрана программная среда твердотельного объёмного моделирования SolidWorks. Применение параметризации позволило создать легко изменяемую цифровую трехмерную модель и рассмотреть множество различных конструктивных исполнений.

Литература

1. Десюкевич, К.Ю., Шипунов, В.В. Проектирование установки для исследований механических свойств проволочной основы материала МР // Студенческая научно-техническая конференция «Лукачёвские чтения – 2017». – Самарский университет, 2017. – 76с.
2. Варжицкий, Л.А., Волкова, Т.В., Чертыковцев, И.В. Разработка устройств для автоматизированного контроля параметров проволочной спирали // Вестник транспорта Поволжья. Самара, 2016. С. 92-97.

СОЗДАНИЕ НОВОЙ АРМАТУРНОЙ СЕТКИ С КВАДРАТНЫМИ ЯЧЕЙКАМИ

Якимова Е.И.

Научный руководитель – доцент, д.т.н. Лебедев В. В.

МГСУ, Мытищинский филиал, Кафедра прикладной механики и математики

E-mail: liz652330@yandex.ru

На основе решения задачи Штейнера о соединении четырёх вершин квадрата самой короткой линией предлагается новый вид ячейки для арматурной сетки. Такая сетка легче традиционной, по массе занимает промежуточное положение между сотовыми (треугольными) и квадратными (крестовыми) ячейками.

Введение. Задача об изготовлении новой арматурной сетки с квадратными облегчёнными ячейками появилась после исследования различного типа перекрытий в строительных конструкциях [1]. При проектировании перекрытий надо учитывать не только прочность конструкции, но и минимизировать массу и расход строительных материалов [2,3]. Такая задача оказалась актуальной не только для строительства, но и особенно для авиационно-космической техники. Особенно важной оказалась задача арматурного обхода деталей. Например, необходимо усилить квадратную или прямоугольную область балками перекрытия в строительстве или силовой арматурой в конструкции космического аппарата, но на пути арматуры находится деталь, которую никак нельзя перенести в другое место: оконный проём, иллюминатор, антенна, датчик и т.д. В этом случае дополнительный силовой элемент прокладывают по обходному пути, увеличивая массу конструкции не только за счёт повышения прочности, например, проката из сортамента, но и за счёт увеличения расхода материала. В этой работе изучается вопрос минимизации массы конструкции при оптимизации арматурного обхода деталей.

Даже самая простая задача о перекрытии квадратной области балками имеет далеко нетривиальное решение в виде двух диагоналей. Но даже при диагональном перекрытии не было изучено утяжеление конструкции при отступах от рациональной схемы схождения балок в центре квадрата. Обобщением задачи арматурного обхода деталей с минимальным утяжелением конструкции является прямоугольная область. Задачи для перекрытия квадратной и прямоугольной областей были решены строго аналитически методами математического анализа. Была записана целевая функция – общая длина балок перекрытия квадратной или прямоугольной области, применено необходимое условие экстремума, проверено достаточное условие минимума и получен, казалось бы, тривиальный результат о рациональности диагонального перекрытия. Однако этот результат был использован в качестве исходных данных для расчёта проигрыша в длине перекрытия при отступе от рациональной схемы диагонального перекрытия. Полученные аналитические результаты были проверены численно с помощью программы MathCAD-14.

Эти графики показали, что для квадрата проигрыш в массе (вертикальные оси) при арматурном обходе одинаков при отступе от центра в любом направлении (горизонтальные оси). Но для прямоугольника, например, с удлинением 10:1 дело обстоит иначе: по ширине прямоугольника точку сходимости арматуры можно перемещать как угодно, вплоть до касания длинной стороны, а по длине – очень ограниченно, не более чем на четверть длинной стороны, потому что потом масса арматурного перекрытия будет резко возрастать, значительно утяжеляя конструкцию. В работе было сформулировано практическое правило арматурного обхода детали, расположенной вблизи центра прямоугольника: рациональнее сдвигать точку сходимости балок или арматуры по ширине, чем по длине.

Методы. Появилась задача о существовании других схем армирования квадратной области. Является ли диагональное перекрытие самым лёгким. В геометрии известна задача Штейнера о соединении четырёх вершин квадрата самой короткой линией [4]. Эту задачу можно решить методами математического анализа только при условии, что общий вид соединительной линии известен априорно, например, четыре сходящихся отрезка, как в рассмотренных уже случаях. Но почему четыре отрезка? Штейнер доказал, что пять отрезков соединяют четыре вершины квадрата по более короткому пути, чем четыре. Однако вопрос определения общего вида соединительной линии остался открытым.

А.И.Драцкая предложила определять вид оптимальной соединительной линии по аналогии с мыльными плёнками, натянутыми на проволочный кубический каркас. Вид мыльных плёнок сбоку совпадает с формой соединительной линии, предложенной Штейнером [4-7]. После определения вида соединительной линии не составляет труда записать целевую функцию, применить необходимое условие экстремума, проверить достаточное условие экстремума и доказать, что в треугольниках отрезки должны быть наклонены к стороне квадрата под углом 30^0 , или, что тоже самое, как у Штейнера, углы треугольников рядом с перемычкой должны быть равны 120^0 . Самое главное то, что ячейка квадратная, поэтому может соединяться с другими квадратными ячейками в новую экономичную арматурную сетку. Квадратная ячейка Штейнера на 3,5% легче традиционной элементарной ячейки-крестика, применяемой в строительстве или в конструкции космических аппаратов, например, в тканевых материалах.

Ячейка Штейнера обладает свойством анизотропии прочности вследствие нарушения диагональной симметрии по сравнению с традиционной ячейкой-крестиком. Свойство анизотропии прочности ячейки Штейнера позволяет создавать множество вариантов арматурных сеток с такими ячейками – все они будут на 3,5% легче традиционных арматурных сеток или тканей с распространёнными квадратными ячейками.

Подтверждение правильности полученных результатов можно найти в природном явлении, в трещинах на поверхности земли во время высыхания почвы, особенно глинистого грунта. Усадка грунта при его высыхании приводит к сжатию материала, поэтому обязательно появятся трещины. Естественно, что трещины будут образовываться по самым коротким линиям. Значит, в картине растрескивания грунта обязательно должны присутствовать ячейки Штейнера, в том числе и для квадрата.

Дальнейшее исследование квадратных ячеек Штейнера связано с изучением их инерционных свойств, построением эллипса инерции для единичной ячейки и комбинации различных соединений анизотропных ячеек и расчётом прочности предлагаемой новой облегчённой армированной конструкции. А.И.Драцкая предложила обобщение задачи Штейнера для соединения восьми вершин куба самой короткой линией с переходом к оптимальному пространственному армированию конструкций [2]. По результатам работы подготовлены заявки на получение патентов на изобретение и полезную модель, а также заявка на участие в конкурсе «УМНИК» (Участник молодёжного научно-инновационного конкурса).

Цель работы - экономия металла, а значит, и финансовых средств. Вполне реально получить экономию металла 3,5%. Для строительных объектов типа современных 20-этажных зданий такая экономия металла позволит сократить финансовые расходы на строительство на 0,64-15,7 млн. руб. Для достижения цели работы была решена задача о свойствах рациональной ячейки арматурной сетки. Обычная "квадратная" сетка на арматуре имеет элементарную ячейку "крестик", интуитивно производимую предприятиями без анализа оптимальности. Более сложные самые экономичные арматурные сетки "соты" применяются исключительно в специальной технике (авиация и космонавтика), в строительстве практически не используются, потому что в зданиях и сооружениях углы в основном прямые. Предлагаю к промышленному производству промежуточный вариант арматурной сетки, между неэкономичной квадратной и самой экономичной сотовой - это квадратные ячейки Штейнера, созданные на основе решения известной задачи математика о соединении четырёх вершин квадрата самой короткой линией.

Литература

1. Марутян А.С., Оробинская В.Н. Трехгранные фермы покрытий (перекрытий) и оптимизация их высот // Вестник МГСУ: Научно-технический журнал по строительству и архитектуре. – Том 12. Вып. 2 (101). - DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.-М.: ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ». - С.172.
2. Якимов Е.И. Минимизация силового арматурного перекрытия прямоугольной формы / Строительство — формирование среды жизнедеятельности. - Электронный ресурс: сборник трудов XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (26–28 апреля 2017 г., Москва).

- М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. - Электрон. дан. и прогр. (73,7 Мб). — Москва : Изд-во Моск. гос. строит. Ун-та, 2017. — Режим доступа: <http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkrdostupa/> — Загл. с титул. экрана. - ISBN 978-5-7264-1660-1.- С.420-424.
3. Драцкая А.И., Скворцова А.А., Якимова Е.И. Оптимизация арматурного перекрытия в строительных конструкциях / Сборник тезисов участников форума «Наука будущего – наука молодых». – Нижний Новгород, 12-15 сентября 2017, в двух томах. – Том 1. – 295 с.: Ил. – Секция 4: «Математика и механика». – С.187-189. – ISBN 978-5-9907236-7-2; 978-5-9907236-8-9. – Электронный ресурс: <http://sfy-conf.ru/>
 4. Протасов В.Ю. Максимумы и минимумы в геометрии. – Библиотека «Математическое просвещение» М.: Изд-во Московского центра непрерывного математического образования, 2005. – 56 с. – Электронный ресурс: <https://www.mccme.ru/free-books/mmmf-lectures/book.31.pdf>
 5. Драцкая А.И., Скворцова А.А. Структуры на основе минимальных поверхностей / II Международная школа конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Биомедицина, материалы и технологии XXI века», 20-23 сентября 2016. – Казанский (Приволжский) федеральный университет. – Казань: Изд. К(П)ФУ, 2016. - С.228. – Эл. ресурс: http://media.wix.com/ugd/14a693_b2c3ef2616904b0e83da5ff924c337a3.pdf
 6. Драцкая А.И., Скворцова А.А. Минимальные кубические структуры из стержней и плёнок / X Всероссийский форум студентов, аспирантов и молодых учёных «Наука и инновации в технических университетах». – Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, 24-29 октября 2016. – Секция «Новые материалы и технологии». – С.47-48. – Электронный ресурс: <http://ysc.spbstu.ru/forum2016/Forum2016.pdf>
 7. Драцкая А.И., Скворцова А.А. Минимальные кубические ячейки из стержней и плёнок для композиционного материала / 59-я Всероссийская научная конференция с международным участием. – МФТИ-ФАЛТ, г. Жуковский, Московская область. – 21-26 ноября 2016 – Секция «Прочность летательных аппаратов». – Доклад 1505. – Электронный ресурс: http://conf59.mipt.ru/static/reports_pdf/1505.pdf

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИНСТРУМЕНТА С ВЯЗКОУПРУГОЙ ТКАНЬЮ

Яковенко А. А.

ИПМех РАН

E-mail: anastasiya.yakovenko@phystech.edu

Рассмотрена проблема взаимодействия штампа с однородным и неоднородным основанием, обладающим релаксационными свойствами. Для изучения механических процессов решены контактные задачи о внедрении жесткого сферического индентора в однородное вязкоупругое полупространство и в неоднородное многослойное основание. Полученные результаты дают возможность оценить прилагаемые нагрузки и контактные давления, возникающие в ткани человека при взаимодействии с инструментом.

Рассмотрена проблема взаимодействия штампа с однородной и неоднородной средой, обладающей релаксационными свойствами. Для изучения механических процессов, возникающих при данном взаимодействии, решаются контактные задачи о внедрении сферического индентора с постоянной скоростью V в однородное вязкоупругое полупространство и в неоднородное многослойное основание, включающее в себя вязкоупругий слой.

Данная проблема является актуальной в медицинской сфере, так как существует широкий класс процедур, сопровождаемых взаимодействием медицинских инструментов с телом человека. Например, при проведении хирургических операций, диагностических процедур, массажа происходит внедрение инструментов разной формы в мягкую биологическую ткань. Поскольку данные процессы преследуют совершенно различные цели, необходимо иметь полное представление о возникающих в тканях напряжениях. Построенная в данной работе модель позволяет исследовать изменения контактных давлений и напряжений в тканях при их деформировании. А так как мышечная ткань имеет релаксационные свойства, то рассмотрение вязкоупругих моделей имеет практическое значение.

В случае внедрения сферического индентора в вязкоупругое полупространство использовался подход Радока, при котором производится замена упругих постоянных в известном упругом решении соответствующими интегральными операторами из определяющих соотношений вязкоупругости. В качестве известного упругого решения бралось решение Герца. Так как внедрение происходит с постоянной скоростью, то, следовательно, задана зависимость области контакта от времени. Это позволяет получить зависимости от времени нагрузки, прилагаемой к инструменту, и максимального давления в центре области контакта. При этом в рассмотрение бралось два вида ядер релаксации в общем виде: экспоненциальное ядро,

$$\Psi(t) = E(I - \lambda e^{-\beta t} I),$$

и ядро Абеля,

$$\Psi(t) = E \left(I - \frac{\beta}{\Gamma(1-\alpha)(t+t_0)^\alpha} I \right).$$

Затем также анализировался и частный случай, ядро Кельвина-Фойгта. Полученные результаты позволяют также оценить влияние скорости внедрения индентора на изменение нагрузок.

В случае неоднородного многослойного основания использовались упрощенные модели: для упругого слоя – модель Винклера, для вязкоупругого – модель Кельвина-Фойгта. В частности, установлено, что при внедрении с постоянной скоростью сферического индентора в двухслойную среду, состоящую из поверхностного упругого слоя, лежащего на вязкоупругом, давления под индентором возрастают со временем, при этом растет и нагрузка, действующая на индентор. Наличие верхнего упругого слоя определенной толщины накладывает ограничение на величину внедрения (или время). Полученные временные зависимости нагрузок и контактных давлений были сравнены с результатами, полученными для однородного вязкоупругого основания, моделируемого сплошной средой.

Полученные результаты позволяют оценить прилагаемые нагрузки и контактные давления, возникающие в ткани человека при взаимодействии с инструментом, для разных

скоростей внедрения. Также они дают возможность выбрать подходящую модель для описания ткани в зависимости от цели исследования и характеристик исследуемой биологической ткани.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-58-52033).

Литература

1. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия. – М.: Наука, 2001. – 478 с.
2. Горячева И. Г., Садовничий В. А. Применение методов механики контактных взаимодействий при диагностике патологических состояний мягких биологических тканей - М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009. - 306 с.
3. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия – М.: Мир, 1989. – 510 с.
4. Yakovenko, I. Goryacheva and M. Dosaev. Estimating characteristics of a contact between sensing element of medical robot and soft tissue. – Springer, 2017. – P. 561-569.

ВЫТЯЖКА ИЗДЕЛИЙ С ШИРОКИМ ФЛАНЦЕМ ЧЕРЕЗ РАДИАЛЬНУЮ МАТРИЦУ

Яковлев С. С.

Научный руководитель – доцент, д.т.н. Ларин С. Н.

ТулГУ, Политехнический институт, Кафедра механики пластического формоизменения

E-mail: suleea@yandex.ru

Процесс вытяжки является очень распространенной операцией листовой штамповки, с помощью которой получают огромное количество наименований изделий, в основном представляющих собой цилиндр с различной формой дна и фланца. Данный процесс в связи с распространённостью хорошо изучен, однако в литературе мало внимания уделяется учету механических и физических свойств металла на устойчивое протекание процесса. В данной работе представлена первая вытяжка с прижимом фланца через матрицу с радиальной формой рабочей кромки листового материала, характеризующегося анизотропными свойствами. В качестве допущений при расчетах мы принимаем, что материал несжимаем, проявляет анизотропные свойства, изотропно упрочняется. Для описания поведения материала актуально условие текучести Мизеса-Хилла и ассоциированный закон течения. При расчетах считаем, что операция вытяжки происходит в условиях плоского напряженного состояния. Для наших условий деформирования принимается справедливость реализации закона трения Кулона на границах заготовки и инструмента.

При моделировании данного процесса пользуемся способом, основанном на одновременном решении приближенных дифференциальных уравнений равновесия и условий текучести, который учитывает сопряжения на контактных границах и изменение течения материала. Перед расчетом очаг деформации делим на несколько участков. Анализ исследуемой операции проводим для начальной стадии вытяжки и стадии, при которой происходит совпадение центра закругления пуансона с верхней кромкой матрицы.

Напряженно-деформированное состояние изделия исследуем с разбивкой очага деформации на три характерных участка: первый участок находится в части заготовки, который лежит на поверхности матрицы и ограничен торцом заготовки с одной стороны; второй участок включает входную кромку матрицы и лимитируется координатами и текущим углом охвата заготовкой тороидальной поверхности матрицы; третий участок находится между входной поверхностью конуса матрицы и кромкой пуансона. По результатам моделирования были получены соотношения, позволяющие проанализировать влияние таких параметров, как степень деформации, размеры инструмента, параметры трения и давление прижима на силу вытяжки с фланцем для разных материалов и размеров заготовок.

Получены зависимости, позволяющие оценить изменение относительной величины силы при вытяжке от относительной величины радиуса матрицы, коэффициента вытяжки, коэффициента трения и относительной величины давления прижима при постоянных величинах других характеристик для стали, латуни и алюминиевого сплава.

Полученные результаты можно использовать как рекомендации при проектировании технологических процессов.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 16-48-710014 и гранта администрации Тульской области.

РАСЧЁТ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ПЕРЕОХЛАЖДЕННОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКЕ

Яруллин Д. Т.

Научный руководитель – доцент, к.ф.-м.н. Галимзянов Б. Н.

КФУ, Институт физики, Кафедра вычислительной физики

E-mail: Dinar96@list.ru

В настоящее время, изучение и количественная характеристика начальных этапов структурно-фазовых трансформаций является одним из актуальных задач физики конденсированного состояния. Большой интерес к этой задаче вызван отсутствием понимания морфологии формирующихся структур на этапе зарождения первых очагов новой фазы. Одной из причин является малый размер зародышей и высокая кривизна межфазной границы, что существенно осложняет их детектирование с помощью экспериментальных методов и затрудняет проведение теоретического описания. С другой стороны, возникает необходимость в непрерывной «слежке» за ростом (изменением) размера зародыша во времени, что сложно осуществить экспериментально. Использование методов компьютерного моделирования позволяет избежать указанных недостатков.

В настоящей работе рассматривается процесс кристаллизации переохлажденной жидкости, которая представляет собой тонкую пленку. Взаимодействие атомов задается через потенциал Джуготова, который позволяет эффективным образом воспроизвести свойства металлических систем. Основное внимание уделяется оценке морфологии формирующихся кристаллических структур при различных уровнях переохлаждения системы. Нами показано, что уменьшение температуры системы (или увеличение степени переохлаждения) приводит к формированию кристаллических зародышей, характеризующихся несферической формой. Обнаружено, что вблизи и ниже температуры стеклования происходит резкое замедление роста количества формирующихся зародышей. Полученные результаты сравниваются с доступными экспериментальными данными и результатами численного моделирования.

**МЕЖДУНАРОДНАЯ МОЛОДЁЖНАЯ НАУЧНАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ**

«XLIV ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ»

СЕКЦИЯ

*Механика и моделирование
материалов и технологий*

СБОРНИК ТРУДОВ

ISBN 978-5-91741-213-9



Подписано к печати 03.04.18

Заказ № 6-2018

Тираж 50 экз.

Отпечатано на ризографе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт проблем механики им.А.Ю.Ишлинского
Российской академии наук
119526, Москва, пр-кт Вернадского, д.101-1