

МГУ имени М.В. Ломоносова

Кафедра теории пластичности

№ госрегистрации
AAAA-A16-116071210057-9

УТВЕРЖДАЮ
Директор/декан

«__» _____ Г.

УДК
539.3 Механика деформируемых тел. Упругость. Деформации

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Механика деформируемого твердого тела
по теме:

Феноменологические теории деформирования и разрушения твердых тел.
2016-2020
(заключительный)

Зам. директора/декана
по научной работе

«__» _____ Г.

Руководитель темы
Ломакин Е.В.

«__» _____ Г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:

заведующий кафедрой, доктор
физико-математических наук,
профессор по кафедре, член-
корреспондент

_____ (Ломакин Е.В.)

Исполнители темы:

доцент, кандидат физико-
математических наук
доцент, кандидат физико-
математических наук

_____ (Белякова Т.А.)

_____ (Киселев Ф.Б.)

_____ (Мельников А.М.)

_____ (Мовчан А.А.)

профессор, доктор физико-
математических наук

научный сотрудник, кандидат
физико-математических наук

_____ (Овчинников И.В.)

доцент, кандидат физико-
математических наук

_____ (Сахаров А.Н.)

специалист, доктор физико-
математических наук

_____ (Федулов Б.Н.)

доцент, кандидат физико-
математических наук

_____ (Хвостунков К.А.)

профессор, доктор физико-
математических наук, профес-
сор по кафедре

_____ (Шешенин С.В.)

РЕФЕРАТ

Ключевые слова:

идентификация материальных функций, наполненные полимерные материалы, деформирование, трещины, дилатирующие среды, нелинейная вязкоупругость, упругость, предельное состояние, алгоритмы расчета

Ключевые слова по-английски:

cracks, filled polymeric materials, plasticity, the nonlinear viscoelasticity, elasticity, dilatant environments, constitutive laws, material functions identification, calculation algorithms, deformation

Для изучения напряженно-деформированного состояния (НДС) композита на микроуровне и исследования концентрации напряжений вблизи включений карбида бора различной формы использовались модели трехмерной реальной микроструктуры композита B4C/2024Al. Полученные результаты исследования НДС образцов на микроуровне имеют практическое значение, так как позволяют определить зоны концентрации напряжений и, следовательно, прогнозировать условия нагружения, при которых можно ожидать нарушение внутренней целостности композита.

Получена связанная физически и геометрически нелинейная формулировка краевой задачи при использовании подхода Лагранжа с адаптацией для твердой фазы и подхода ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) для жидкости в предположении квазистатического деформирования каркаса. В методе решения связанной задачи осуществляется линеаризация вариационных уравнений в сочетании с внутренними итерациями по методу Узавы для связывания на каждом шаге по времени. Для пространственной дискретизации используется метод конечных элементов: элементы трилинейного типа для аппроксимации собственно уравнения фильтрации и квадратичные элементы для аппроксимации уравнений равновесия. Для учета сил инерции применяется неявная схема по времени. Полученная вариационная формулировка справедлива для гиперупругого материала скелета грунта и для модели пластического течения.

Для многих материалов переход из упругого состояния в пластическое определяется не только величиной интенсивности касательных напряжений или эквивалентным напряжением, но и гидростатической компонентой напряжений. Это связано с тем, что механизм необратимого деформирования материалов имеет не только сдвиговую природу, как это принято в классических теориях пластичности для пластически несжимаемых материалов, но также включает зарождение и развитие микротрещин, пор и других элементов неоднородности структуры. Такие процессы характерны для различных конструкционных материалов, таких как чугун, графит, огнеупорные керамики, горные породы, полимерные материалы, некоторые металлические сплавы. При решении различных практически важных задач чаще всего используется модель Друкера-Прагера [1] с условием пластичности, включающим первый инвариант тензора напряжений и второй инвариант девиатора напряжений. Для этой модели получено аналитическое решение задачи о пространстве с круговым отверстием под действием внутреннего давления для случая плоской деформации. Исследовано влияние зависимости пластических свойств материала от вида напряженного

состояния на характер распределения напряжений и размер пластических областей в зависимости от параметра, характеризующего чувствительность пластических свойств материала к виду внешних воздействий.

Рассматривается влияние микроструктуры на процесс сверхпластической формовки сферической оболочки из круглой листовой пластины. Пластина из титанового сплава жёстко закреплена по краям, её толщина мала по сравнению с радиусом, что позволяет применить для моделирования мембранную теорию. Для одновременного выполнения краевых условий и уравнений равновесия используется находящаяся экспериментальное подтверждение гипотеза о параболическом распределении деформаций [5]. Исследована зависимость результирующего распределения толщины оболочки от начального среднего размера зёрен. Показано, что существует оптимальный размер, обеспечивающий при относительно невысоких значениях давления газа минимальное истончение пластинки (отношение толщины в куполе и заделке) для заданного режима деформирования.

Решены задачи термоупругости в средах с фазовыми переходами в приложении к механике грунтов. Фазовые переходы вызваны замерзанием-таянием поровой влаги под действием переменных во времени температурных полей. Задача термоупругости ставится в связанной постановке, но фактический алгоритм, используемый авторами при решении приведенных в работе задач, эту связанность не использует. Основное внимание уделено решению именно уравнения теплопроводности, а не уравнения теории упругости в форме Дюгамеля-Неймана. При решении уравнения теплопроводности задача ставится, как граничная обратная. Для граничного условия третьего рода, учитывающего теплообмен с окружающей средой за счет теплопередачи, теплового потока и потока солнечной радиации, трудно определяемым при практических измерениях является коэффициент поглощения солнечной радиации. Дополнительным условием, используемым при решении обратной задачи, является задаваемая на некоторой глубине в теле температура. Используется метод А.Н.Тихонова минимизации регулирующего функционала при нелокальном возмущении граничного условия. Решена тестовая задача, подтверждающая корректность численного алгоритма решения обратной задачи и прямая задача, подтверждающая важность учета потока солнечной радиации при прогнозировании теплового деформирования мерзлых грунтов.

Исследованы распределения напряжений и деформаций в диске из материала с нелинейными диаграммами деформирования, зависящими от вида напряженного состояния. Проведены расчеты с использованием экспериментальных данных для серого чугуна и конструкционного графита, на основе которых можно заключить, что степень чувствительности свойств материалов к виду напряженного состояния оказывает незначительное влияние на величины напряжений в диске, но весьма существенно влияет на значения деформаций по сравнению с результатами расчетов для материала с инвариантными к виду внешних воздействий свойствами. Рассматриваемые материалы относятся к классу хрупких или полу-хрупких, для которых часто используются деформационные критерии прочности, поэтому данный результат имеет определенное значение.

ВВЕДЕНИЕ

Для многих материалов переход из упругого состояния в пластическое определяется не только величиной интенсивности касательных напряжений или эквивалентным напряжением, но и гидростатической компонентой напряжений. Это связано с тем, что механизм необратимого деформирования материалов имеет не только сдвиговую природу, как это принято в классических теориях пластичности для пластически несжимаемых материалов, но также включает зарождение и развитие микротрещин, пор и других элементов неоднородности структуры. Такие процессы характерны для различных конструкционных материалов, таких как чугун, графит, огнеупорные керамики, горные породы, полимерные материалы, некоторые металлические сплавы.

При совместном деформировании пористого скелета и содержащейся в порах жидкости происходит взаимодействие твердой и жидкой фаз грунта. В работе это взаимосвязанное явление фильтрации жидкости и деформирования скелета грунта описывается связанной системой уравнений в частных производных, которые записаны из общих законов сохранения механики сплошной среды (уравнения равновесия, закона сохранения масс твердой и жидкой фаз грунта и закона фильтрации Дарси) с применением пространственного осреднения по представительной области. Для определения эффективных модулей возможен подход, основанный на решении локальных задач в представительной области.

В рамках модифицированной модели нелинейного термомеханического поведения сплавов с памятью формы при фазовых и структурных превращениях описаны процессы изменения напряженно – деформированного состояния однонаправленного композита с упругим связующим и волокнами из никелида титана. Предварительно волокнам с помощью явлений накопления деформации прямого превращения или мартенситной неупругости задается начальная фазово – структурная деформация. После этого волокна, находящиеся в мартенситном фазовом состоянии, совмещаются со связующим с тем, чтобы обеспечить совместное деформирование обоих компонент. При последующем нагреве волокон в них происходит обратное термоупругое мартенситное фазовое превращение, сопровождающееся явлением памяти формы. В результате весь композит испытывает продольные сжимающие деформации, в его элементах возникают внутренние напряжения (сжимающие в связующем и растягивающие в волокнах). При последующем охлаждении волокон в них будет происходить прямое термоупругое мартенситное фазовое превращение под действием внутренних растягивающих напряжений.

Сверхпластичность — режим деформирования, при котором поликристаллический материал способен испытывать большие деформации (сотни процентов) без образования существенных микроструктурных дефектов [1]. На сегодняшний день известно, что большинство металлов и металлических сплавов, а также ряд керамик и интерметаллидов могут входить в режим сверхпластического течения при соответствующих условиях деформирования, среди которых наиболее важными оказываются высокие температуры, низкие скорости деформирования и определенным образом подготовленная микроструктура [2]. Микроструктурные процессы, происходящие в зернах металлических сплавов при деформации, играют особую роль в сверхпла-

стичности. Определяющие соотношения сверхпластичности обычно содержат параметр, связанный с размером зерна, и эволюционные уравнения для него.

Работа посвящена исследованию свойств композита с алюминиевой матрицей и микродисперсными включениями карбида бора. Реальные включения моделируются эллипсоидами с геометрическими параметрами, статистически близкими к реальным включениям. Пространственная ориентация эллипсоидов случайная, поскольку в расположении включений в реальном материале отсутствует упорядоченность. Исследование проводится на основании численных экспериментов по двум направлениям. Во первых, вычисляется зависимость эффективных свойства композита от процентной объемной доли включений путем решения серии статических задач теории упругости. Диапазон изменения процентной концентрации включений составляет 5 - 20 %%. Во-вторых, исследуется поведение материала по действием динамической нагрузки. В частности, вычисляется зависимость от процентной доли включений падения амплитуды продольных колебаний по мере прохождения волны по объему композита. Характеристика такого падения амплитуды названа автором коэффициентом затухания колебаний. Проведенные исследования при анализе результатов динамического поведения композита позволяют утверждать, что и для длинных волн имеет место влияние микроструктуры материала на их распространение.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для изучения напряженно-деформированного состояния (НДС) композита на микроуровне и исследования концентрации напряжений вблизи включений карбида бора различной формы использовались модели трехмерной реальной микроструктуры композита В4С/2024Al. Полученные результаты исследования НДС образцов на микроуровне имеют практическое значение, так как позволяют определить зоны концентрации напряжений и, следовательно, прогнозировать условия нагружения, при которых можно ожидать нарушение внутренней целостности композита.

Получена связанная физически и геометрически нелинейная формулировка краевой задачи при использовании подхода Лагранжа с адаптацией для твердой фазы и подхода ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) для жидкости в предположении квазистатического деформирования каркаса. В методе решения связанной задачи осуществляется линеаризация вариационных уравнений в сочетании с внутренними итерациями по методу Узавы для связывания на каждом шаге по времени. Для пространственной дискретизации используется метод конечных элементов: элементы трилинейного типа для аппроксимации собственно уравнения фильтрации и квадратичные элементы для аппроксимации уравнений равновесия. Для учета сил инерции применяется неявная схема по времени. Полученная вариационная формулировка справедлива для гиперупругого материала скелета грунта и для модели пластического течения.

Для многих материалов переход из упругого состояния в пластическое определяется не только величиной интенсивности касательных напряжений или эквивалентным напряжением, но и гидростатической компонентой напряжений. Это связано с тем, что механизм необратимого деформирования материалов имеет не только сдвиговую природу, как это принято в классических теориях пластичности для пластически несжимаемых материалов, но также включает зарождение и развитие микротрещин, пор и других элементов неоднородности структуры. Такие процессы характерны для различных конструкционных материалов, таких как чугун, графит, огнеупорные керамики, горные породы, полимерные материалы, некоторые металлические сплавы. При решении различных практически важных задач чаще всего используется модель Друкера-Прагера [1] с условием пластичности, включающим первый инвариант тензора напряжений и второй инвариант девиатора напряжений. Для этой модели получено аналитическое решение задачи о пространстве с круговым отверстием под действием внутреннего давления для случая плоской деформации. Исследовано влияние зависимости пластических свойств материала от вида напряженного состояния на характер распределения напряжений и размер пластических областей в зависимости от параметра, характеризующего чувствительность пластических свойств материала к виду внешних воздействий.

Рассматривается влияние микроструктуры на процесс сверхпластической формовки сферической оболочки из круглой листовой пластины. Пластина из титанового сплава жестко закреплена по краям, её толщина мала по сравнению с радиусом, что позволяет применить для моделирования мембранную теорию. Для одновременного выполнения краевых условий и уравнений равновесия используется находящая экспериментальное подтверждение гипотеза о параболическом распределении деформаций [5].

Исследована зависимость результирующего распределения толщины оболочки от начального среднего размера зёрен. Показано, что существует оптимальный размер, обеспечивающий при относительно невысоких значениях давления газа минимальное истончение пластинки (отношение толщины в куполе и заделке) для заданного режима деформирования.

Решены задачи термоупругости в средах с фазовыми переходами в приложении к механике грунтов. Фазовые переходы вызваны замерзанием-таянием поровой влаги под действием переменных во времени температурных полей. Задача термоупругости ставится в связанной постановке, но фактический алгоритм, используемый авторами при решении приведенных в работе задач, эту связанность не использует. Основное внимание уделено решению именно уравнения теплопроводности, а не уравнения теории упругости в форме Дюгамеля-Неймана. При решении уравнения теплопроводности задача ставится, как граничная обратная. Для граничного условия третьего рода, учитывающего теплообмен с окружающей средой за счет теплопередачи, теплового потока и потока солнечной радиации, трудно определяемым при практических измерениях является коэффициент поглощения солнечной радиации. Дополнительным условием, используемым при решении обратной задачи, является задаваемая на некоторой глубине в теле температура. Используется метод А.Н.Тихонова минимизации регулирующего функционала при нелокальном возмущении граничного условия. Решена тестовая задача, подтверждающая корректность численного алгоритма решения обратной задачи и прямая задача, подтверждающая важность учета потока солнечной радиации при прогнозировании теплового деформирования мерзлых грунтов.

Исследованы распределения напряжений и деформаций в диске из материала с нелинейными диаграммами деформирования, зависящими от вида напряженного состояния. Проведены расчеты с использованием экспериментальных данных для серого чугуна и конструкционного графита, на основе которых можно заключить, что степень чувствительности свойств материалов к виду напряженного состояния оказывает незначительное влияние на величины напряжений в диске, но весьма существенно влияет на значения деформаций по сравнению с результатами расчетов для материала с инвариантными к виду внешних воздействий свойствами. Рассматриваемые материалы относятся к классу хрупких или полу-хрупких, для которых часто используются деформационные критерии прочности, поэтому данный результат имеет определенное значение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены важные для дальнейшего развития направления результаты в области дилатирующих сред, материалов с памятью формы, грунтов, сверхпластичности, нелинейных свойств композиционных материалов.

Данные результаты будут являться заделом по новому направлению исследования: Феноменологические модели деформирования и разрушения перспективных материалов и конструкций.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2020 году
Таблица А.1

Источник финанси- рования	Объем (руб.)	
	Получено	Освоено собственными силами
Денежные сред- ства в виде субси- дии на выполнение фундаментальных научных исследо- ваний в соответ- ствии с госзадани- ем МГУ, часть 2 (р. 01 10)	752 000,0	752 000,0