



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель Генерального
директора ОАО «Композит»

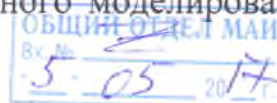
А.Э. Дворецкий А.Э. Дворецкий

« 2 » *мая* 2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации открытого акционерного общества «Композит» на диссертацию Юрина Юрия Викторовича «Моделирование деформаций ползучести многослойных тонких пластин методом асимптотического осреднения», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

Актуальность темы. В представленной диссертационной работе рассматриваются вопросы моделирования напряженно-деформированного состояния многослойных тонких пластин с учетом эффектов ползучести методом асимптотического осреднения. Многослойные тонкостенные конструкции находят широкое применение в современной инженерной практике. Проблема создания таких конструкций, предполагающих эксплуатацию при длительных воздействиях высоких температур, является актуальной задачей в космической, атомной, авиационной и других отраслях промышленности. При проведении расчетов прочности и долговечности тонкостенных конструкций в указанных эксплуатационных условиях встает необходимость учета эффектов ползучести. Среди моделей процесса ползучести необходимо выделить широко применяемый в настоящее время класс – модели на основе теории течения, которые достаточно точно описывают эффекты ползучести в жаропрочных сплавах. Одной из основных причин потери прочности многослойных тонкостенных конструкций является появление дефектов типа расслоения, для корректного моделирования



которых необходим учет не только изгибных и сдвиговых напряжений в плане, но также напряжений межслойного сдвига и нормальных напряжений.

По сравнению с прямым решением трехмерных задач такие подходы позволяют избавиться от необходимости применения конечно-элементных сеток больших размерностей. Такое преимущество достигается путем использования аналитических зависимостей для аппроксимации решения по толщине конструкции. Зачастую указанные аппроксимации строятся на основе некоторых допущений и не имеют математического обоснования. В связи с этим применение для вывода таких теорий метода асимптотического осреднения, позволяющего проводить анализ асимптотического поведения полученных задач, представляется более корректным с математической точки зрения. Данный метод получил широкое распространение при рассмотрении процессов в периодических средах, таких как конструкции из композиционных материалов. В представленной диссертационной работе предложен новый вариант метода расчета напряженно-деформированного состояния многослойных тонких пластин с учетом эффектов ползучести. Данный метод базируется на применении асимптотического осреднения, не требует введения допущений для вывода аналитических зависимостей, аппроксимирующих решение по толщине пластины и позволяет получить соответствующие двумерные системы уравнений и выражения для всех компонент тензора напряжений.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании элементов энергетических установок, включая ядерные, двигательных установок и аэродинамических узлов сверх- и гиперзвуковых летательных аппаратов и других конструкций, длительное время находящихся под воздействием комбинированного теплосилового нагружения.

Научная новизна работы состоит в следующих основных результатах, полученных автором:

- применен новый подход для вывода двумерных систем уравнений ползучести многослойных тонких пластин и выражений для компонент тензоров напряжений, деформаций, вектора перемещений, основанный на использовании метода асимптотического осреднения для анализа исходной трехмерной системы уравнений ползучести без дополнительных допущений о виде аналитической зависимости, аппроксимирующей решение по толщине пластины;
- предложен конечно-элементный метод решения двумерных задач ползучести тонких многослойных пластин, в котором использован вариационный принцип Хеллингера-Рейснера для вывода вариационных уравнений, применены аппроксимация на основе трикубических полиномов Биркгофа со специальным выбором степеней свободы для продольных перемещений, аппроксимации Белла для прогибов.

Достоверность результатов, полученных в рамках диссертационной работы, основана на применении подтверждённых теоретических методов и сравнении с результатами, полученными с помощью прямого трехмерного конечно-элементного моделирования в программном комплексе ANSYS и на основе других расчетных методов.

Практическая значимость диссертации состоит в представленном в ней новом вычислительном методе для моделирования напряженно-деформированного состояния многослойных тонких пластин с учетом эффектов ползучести. Метод основан на применении асимптотического осреднения для вывода двумерных систем уравнений ползучести многослойной тонкой пластины и выражений для компонент тензоров напряжений, деформаций и вектора перемещений. Также в рамках указанного метода предложен эффективный конечно-элементный метод решения двумерных систем уравнений ползучести. Предложенная методика может быть использована как составная часть при расчетах различных деформационных процессов в многослойных тонких пластинах, проявляющих эффекты ползучести и, вероятно, обладает относительно имеющихся аналогов лучшей эффективностью с точки зрения вычислительных

затрат. Проблема эффективности, а также точности предложенных методов требует отдельного тщательного исследования.

Публикации и апробация работы. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 11 научных работах, в том числе в 10 статьях в журналах из Перечня Высшей аттестационной комиссии и в 1 научной публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Апробация результатов диссертации произведена на различных научных конференциях, а также на семинарах кафедры вычислительной математики и математической физики МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Структура и содержание диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов, заключения и списка литературы из 110 наименований, которые изложены на 141 странице, включает в себя 35 иллюстраций и 12 таблиц.

Во введении обосновывается актуальность темы, производится обзор состояния проблемы исследования, формулируются цель и задачи работы, указываются данные о достоверности результатов работы, научная новизна, положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится вывод двумерных систем уравнений ползучести многослойных тонких пластин и выражений для компонент тензоров напряжений, деформаций и вектора перемещений из исходной трехмерной системы уравнений теории ползучести. Такой вывод делается путем поиска всех неизвестных функций: компонент вектора перемещений, тензоров деформаций и деформаций ползучести, тензора напряжений в форме асимптотических разложений по степеням малого геометрического параметра. Этот подход приводит к двумерным осредненным системам уравнений ползучести типа теории Кирхгофа-Лява. В главе выделяются частные случаи общих соотношений при дополнительном предположении о моноклинности материалов слоев пластины. В частности, отмечается линейная зависимость продольных перемещений от нормальной

координаты пластины подобно формулам в теориях типа Кирхгофа-Лява и Тимошенко.

Во второй главе описывается предложенный в работе конечно-элементный метод решения двумерных осредненных задач ползучести многослойных тонких пластин. Метод базируется на применении вариационного принципа Хеллингера-Рейснера для вывода вариационных уравнений, аппроксимации Белла для прогибов и аппроксимации на основе трикубических полиномов Биркгофа со специальным выбором степеней свободы для аппроксимации продольных перемещений. В главе отмечаются преимущества выбора указанных аппроксимаций и вариационного принципа перед другими вариантами, описывается возможная реализация предложенного конечно-элементного метода.

В третьей главе рассматривается решение конкретных задач без учета и с учетом эффектов ползучести. Приводится решение задачи изгиба тонкой многослойной прямоугольной пластины равномерным давлением с несимметричным расположением слоев без учета эффектов ползучести и граничными условиями жесткого защемления. Слои пластины полагаются составленными из ортотропных материалов. Выписаны формулы для начальных членов асимптотических разложений компонент тензора напряжений. Демонстрация точности асимптотического метода производится путем сравнения результатов вычисления компонент тензора напряжений на основе предложенного метода с результатами расчетов на основе прямого трехмерного конечно-элементного моделирования в программном комплексе ANSYS. Приведенные результаты показывают высокую точность согласования результатов при использовании мелких конечно-элементных сеток при трехмерном моделировании.

Демонстрация точности предложенного конечно-элементного метода решения двумерных осредненных задач производится на задаче изгиба прямоугольной многослойной пластины равномерным давлением с несимметричным расположением слоев без учета эффектов ползучести.

Проведено сравнение результатов расчета на основе аналитического и конечно-элементного решения для компонент вектора перемещений и тензора напряжений. Сравнение проводилось для различных конечно-элементных сеток. Приведенные результаты показывают высокую точность предложенного конечно-элементного метода.

Для оценки точности конечно-элементного метода при учете эффектов ползучести рассмотрена задача изгиба многослойной прямоугольной пластины равномерным давлением с граничными условиями жесткого защемления и симметричным расположением слоев. Использовалась линеаризованная модель ползучести, обеспечивающая возможность получения явного аналитического решения двумерных осредненных задач. Приведенное сравнение результатов расчетов на основе аналитического и конечно-элементного решения для компонент тензора напряжений и вектора перемещений демонстрируют достаточно высокую точность описываемого метода.

Рассмотрена задача изгиба прямоугольной многослойной пластины переменным по пластине давлением с граничными условиями жесткого защемления и несимметричным расположением слоев. В качестве модели ползучести материалов слоев пластины была применена степенная модель ползучести. Приведены результаты расчета полей прогибов, продольных перемещений, распределения компонент тензора напряжений по толщине пластины в различных ее точках для начального и конечного момента моделирования по времени. Так же продемонстрированы кривые изменения прогибов, продольных перемещений, и компонент тензора напряжений во времени. Результаты показывают значительное искажение напряженно-деформированного состояния пластины, вызванное воздействием эффектов ползучести.

В заключении подводится итог работы, перечисляются основные полученные результаты.

По диссертационной работе имеется ряд **замечаний**.

- а) В работе рассматривается исключительно линейно упругое поведение материала при начальном мгновенном нагружении, в то время как значительное число современных материалов имеют нелинейные диаграммы деформирования.
- б) В работе не указано, насколько существенно влияют на точность получаемых результатов различные степени анизотропии слоев материала, не приведены границы применимости приводимых соотношений. Так, в современных углепластиках отношение продольного и поперечного модулей упругости монослоя может составлять $100 \div 1000$.
- в) Из текста диссертации неясно, разрабатывалось ли для проведения расчетов расчетов полностью оригинальное ПО либо использовались имеющиеся наработки. В первом случае ценность работы существенно повышается.

Сделанные замечания не имеют принципиального значения для оценки диссертационной работы. Диссертация представляет собой завершенное, выполненное на высоком научном уровне исследование, посвященное решению актуальной проблемы.

Автореферат и публикации автора достаточно правильно и полно отражают содержание диссертации.

В целом, работа безусловно заслуживает положительной оценки. Диссертационная работа Юрина Юрия Викторовича соответствует всем критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Юрин Юрий Викторович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Диссертация Юрина Ю. В. обсуждена на заседании отдела по исследованию свойств материалов и покрытий (протокол № Х-17-06 от 28 апреля 2017 г.), по

результатам которого было принято решение утвердить положительный отзыв на диссертационную работу.

Зам. начальника отделения 0220, к. т. н



И.В. Магнитский

Начальник отдела 0222, к. ф.-м. н



В.П. Вагин

Главный научный сотрудник
лаборатории 0243, д.т.н.



В.Н. Кириллов

Адрес: 141070, Московская область, г. Королёв, Пионерская ул., д. 4

Тел.: +7 (495) 513-20-28, +7 (495) 513-23-29, факс: +7 (495) 516-06-17

e-mail: info@kompozit-mv.ru