

## Отзыв официального оппонента

на диссертацию Савченко Андрея Андреевича  
«Моделирование реологических процессов и прогнозирование прочностных характеристик пластин из полимерных и композитных материалов»  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук,  
по специальности 02.00.06 - высокомолекулярные соединения.

В диссертации рассматриваются вопросы прогнозирования поведения конструкций из полимерных материалов и их элементов во времени, в том числе явления ползучести.

Для всех полимерных материалов характерно развитие деформаций во времени при постоянных нагрузках (явление ползучести, обусловленное высокоэластическими деформациями). Ползучесть полимеров оказывает двойственное влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) и длительную прочность изделий и конструкций из полимерных композиционных материалов. К негативным эффектам ползучести относится значительный рост перемещений полимерных конструкций и их элементов во времени. Реология может положительно влиять на НДС полимерных элементов, так как при постоянных деформациях происходит релаксация напряжений. В композиционных материалах возможно перераспределение напряжений между полимерной матрицей и армирующими элементами. В этих условиях прогнозирование поведения конструкций из полимерных материалов являются эффективным, что говорит об актуальности оппонируемой диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованной литературы и приложений. Она изложена на 145 страницах машинописного текста и содержит 65 рисунков и 4 таблицы.

По теме диссертации опубликованы 12 печатных работ, из них в ведущих рецензируемых изданиях, определенных ВАК РФ - 5, в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах Scopus / Web of Science - 3. Получено авторское свидетельство на программу для ЭВМ.

Во введении представлено краткое изложение базовых идей концепции прогнозирования поведения конструкций из полимерных материалов и основных нерешенных проблем. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и научная задача, изложены результаты, выносимые на защиту, их новизна, обоснованность и достоверность, приведено краткое изложение содержания диссертации.

В первой главе приведен обзор областей применения полимерных пластин и оболочек в строительстве, рассмотрено современное состояние вопроса в области расчета. Изложены основные теории ползучести

полимерных материалов. Выделена одна из основных рабочих гипотез - равенство нулю объемной деформации ползучести. Гипотеза о не сжимаемости материала при ползучести часто дополняется более сильным предположением о том, что первый инвариант тензора напряжений не влияет на ползучесть

Вторая глава посвящена изучению вопросов расчета с учетом ползучести полимерных изотропных пластин. При решении задач изгиба пластин в основу положена теория Кирхгофа-Лява.

Приведен вывод разрешающих уравнений для расчета изотропных полимерных пластин с учетом ползучести, рассматривается методика конечно-элементного моделирования ползучести пластин произвольной формы. Разработана методика конечно-элементного расчета с использованием треугольных конечных элементов. Приведено численно-аналитическое решение задачи с использованием двойных тригонометрических рядов. На примере пластинки из вторичного поливинилхлорида показано, что напряжения в процессе ползучести меняются незначительно.

Получено решение задач ползучести пластин из вторичного ПВХ при изгибе, а также задача растяжения полосы с отверстием из ПММА.

В двумерной и трехмерной постановке рассмотрены задачи осесимметричного изгиба круглых пластин из ЭДТ-10. Решение выполнено на основе теории тонких пластин, а также для трехмерного тела с учетом толщины при помощи осесимметричных прямоугольных конечных элементов.

Установлено, что в начале процесса ползучести происходит релаксация напряжений, а затем возврат к упругому решению.

В третьей главе рассмотрены вопросы реологического расчета пластин из армированных полимеров.

Установлено, что для ортотропной пластинки, в отличие от изотропной, происходит перераспределение напряжений: напряжения  $\sigma_x$  возрастают, а касательные напряжения  $\tau_{xy}$  убывают.

Приведены универсальные разрешающие уравнения и решение задачи изгиба при ползучести ортотропной пластинки из стеклопластика ВПС-48/120 на основе расплавленного эпоксидного связующего, а также рассмотрен случай плоского напряженного состояния полосы с отверстием из того же материала.

Выявлено существенное перераспределение напряжений: нормальные напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  возрастают, а напряжения  $\tau_{xy}$  убывают. Получены выражения для длительных упругих постоянных, что позволяет найти решение задачи в конце процесса ползучести теми же методами, что и упругое решение.

Четвертая глава посвящена вопросам расчета с учетом ползучести трехслойных конструкций.

Разработана методика определения реологических параметров пенополиуретана при сдвиговой ползучести на основе нелинейного уравнения Максвелла-Гуревича. Показано, что при использовании указанного уравнения качество аппроксимации экспериментальных кривых ползучести выше, чем в случае применения степенного закона Финдли и линейного уравнения Максвелла-Томпсона.

Приведено решение задачи изгиба трехслойной балки с легким заполнителем из жесткого двухкомпонентного пенополиуретана с использованием уравнения Максвелла-Томпсона, а также уравнения Максвелла-Гуревича. Для подтверждения результатов выполнено конечно-элементное моделирование в программном комплексе ЛИРА-САПР в трехмерной постановке с использованием длительных упругих постоянных.

Получена система дифференциальных уравнений для расчета трехслойной пластинки с учетом ползучести. Разработана методика конечно-элементного моделирования ползучести трехслойных пластин при помощи прямоугольных конечных элементов. Представлено сравнение результатов, полученных при помощи МКР и МКЭ. Установлено, что при использовании нелинейного закона ползучести напряжения во времени не постоянны.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам исследований.

Достоверность и обоснованность полученных результатов основана:

- на использовании проверенных методов компьютерного моделирования;
- проверке выполнения всех граничных условий, дифференциальных и интегральных соотношений;
- сравнением полученных результатов с известными решениями других авторов;
- сравнение результатов с решениями в МКЭ комплексах;
- применением нескольких методов к решению одной задачи с последующим сопоставлением результатов.

Автореферат с достаточной степенью полноты и без искажений отражает содержание диссертационной работы.

Теоретическая и практическая значимость полученных в диссертации результатов заключается в:

- теоретическом исследовании ползучести полимерных изотропных пластин на примере полиметилметакрилата, поливинилхлорида и ЭДТ-10 установлено, что при изгибе напряжения в пластинах практически не меняются, а в случае

- плоской задачи в конце процесса ползучести происходит возврат к упругому распределению напряжений;
- установление, что нелинейное уравнение Максвелла-Гуревича по сравнению с другими широко используемыми в литературе законами ползучести более точно описывает кривые сдвиговой ползучести пенополиуретана;
  - определение, что напряжения и деформации в обшивках и заполнителе по нелинейной теории, в отличие от линейной, изменяются во времени, для трехслойных пластин с пенополиуретановым заполнителем;
  - разработке универсального пакета прикладных программ в среде Matlab для расчета однослойных и трехслойных пластин, позволяющем использовать произвольные законы ползучести.

Научная новизна данной диссертационной работы заключается в том, что в ней:

- разработана универсальная методика конечно-элементного моделирования ползучести пластин произвольной формы при изгибе и в случае плоского напряженного состояния;
- исследовано явление концентрации напряжений при растяжении полимерной полосы с отверстием, с учетом нелинейной ползучести на примере полиметилметакрилата;
- в результате экспериментального исследования определены упругие и реологические параметры пенополиуретана при сдвиговой ползучести;
- исследована нелинейная ползучесть трехслойных балок и пластин с пенополиуретановым заполнителем с использованием уравнения Максвелла-Гуревича, а также уравнения Максвелла-Томпсона.

Диссертация написана ясным языком и хорошо оформлена. Материал исследований изложен понятно и логично последовательно. В конце каждой главы сформулированы основные выводы по данной главе.

Отмечаю следующие замечания:

1. В практическом значении диссертационной работы указано, что разработан универсальный пакет прикладных программ в среде Matlab для расчета однослойных и трехслойных пластин. Однако нет описания этого пакета прикладных программ в тексте диссертации. В списке работ есть авторское свидетельство на эту программу для ЭВМ и в Приложении листинг программы.
2. В главе 2 рассматриваются вопросы расчета с учетом ползучести полимерных изотропных пластин. При решении задач изгиба пластин (2.1. с.21) в основу положена теория Кирхгофа-Лява. На

наш взгляд выбор этой теории Кирхгофа-Лява не достаточно полно обоснован.

3. При расчете полимерных пластинок (2.3. с. 36) использовались несколько методов для решения одной и той же задачи, что повышает достоверность результатов. Но для численного метода конечных элементов отсутствует оценка его погрешности и не приведено обоснования выбора шага аргумента для численного решения.
4. При расчете концентрации напряжений при растяжении пластинки из ПММА с отверстием (2.6) получены зависимости изменения во времени наибольших величин различных напряжений (рис. 2.19,21, 23). Эти зависимости имеют экстремумы – минимумы, которым дано качественное объяснение. Напряжения сначала убывают, а потом возрастают, т.к. в конце процесса ползучести происходит возврат к упругому решению. Однако нет количественных оценок значений соответствующего минимумам значения аргумента – времени.
5. В главе 4 описаны испытания конструкций материала с полимерным наполнителем на ползучесть при сдвиге. Для определения реологических параметров пенополиуретана проведены эксперименты (4.1). Экспериментальные результаты автора сравниваются с различными моделями (рис.4.2. с.77). Для полученных результатов отсутствуют оценки экспериментальной погрешности, что затрудняет оценку их достоверности.
6. При решении расчетных задач (главы 1-3) следовало более полно и подробней описать свойства полимеров, которые диссертант использует в своих расчетах.
7. Автор в диссертации не дает объяснения, с чем связан более высокий коэффициент концентрации напряжений для ортотропной пластины по сравнению изотропной.
8. Отметим наличие не значительного количества стилистических ошибок (например, с. 17).

Приведенные замечания не носят принципиальный характер, не влияют на основные выводы диссертационного исследования и не снижают общий научный уровень диссертации.

В целом диссертация является самостоятельным завершенным исследованием. Сформулированные в работе задачи решены, цель исследования достигнута. Диссертация прошла апробацию на международных и всероссийских конференциях. Основные результаты исследования широко опубликованы, в том числе в журналах, рекомендованных ВАК и включенных в системы цитирования Scopus / Web of Science, а также в трудах международных конференций.

Представленная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемые к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), а ее автор Савченко Андрей Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 02.00.06 – высокомолекулярные соединения.

Заведующий кафедрой  
Программного обеспечения  
Тверского государственного  
технического университета  
доктор физ.-мат. наук, профессор



А.Л. Калабин

Калабин Александр Леонидович  
170024 г. Тверь пр. Ленина д.25, ТвГТУ, корп. ХТ, ауд. 303  
[kalabin@tstu.tver.ru](mailto:kalabin@tstu.tver.ru)

