

01.02.04

Щ, 612

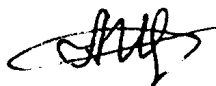
*На правах рукописи*

Щербакова Алла Олеговна

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
СТЕКЛОПЛАСТИКОВ С УЧЕТОМ ДИЛАТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ,  
ОБУСЛОВЛЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЕМ ВЛАЖНОСТИ**

Специальность 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Челябинск - 2002

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Сапожников С.Б.

Официальные оппоненты:

- заслуженный деятель науки и техники  
Российской Федерации,  
доктор технических наук, профессор  
Жилкин В.А.
- доктор технических наук, профессор  
Асташкин В.М.

Ведущее предприятие – ООО "Полидор" (г. Челябинск)

Защита состоится 24 / апреля 2002 г., в 15 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.02 при Южно-уральском государственном университете: 454080, г. Челябинск пр. им. В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ.

Ваш отзыв в двух экземплярах, скрепленных гербовой печатью, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск пр. им. В.И.Ленина, 76, ЮУрГУ, ученый совет. Тел. (351-2) 39-91-23.

Автореферат разослан 23 / марта 2002г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор



Чернявский А.О.

## Общая характеристика работы

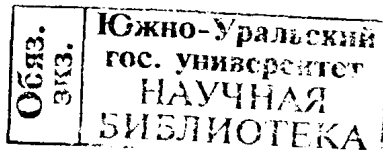
Актуальность работы. В настоящее время волокнистые композитные материалы и стеклопластики с тканевой арматурой, в частности, находят широкое применение в различных отраслях машиностроения. Из них изготавливают элементы взлетно-посадочной механизации крыла самолетов (предкрылки, закрылки, хвостовое оперение), лопасти вертолетов и ветроэнергетических установок, элементы спортивного оборудования (в лыжном и велосипедном спорте) и т.д. Значительная часть подобных конструкций эксплуатируется в условиях непосредственного контакта с атмосферой, где подвергается воздействию дилатационных факторов: влаги окружающей среды, циклическому изменению температуры и др. Перечисленные воздействия, с одной стороны, отражаются на изменении физико-механических свойств компонент материала (волокон и связующего), а с другой стороны, на изменении размеров. Неоднородность структуры армированных пластиков на уровне слоя (мезоуровне) обуславливает тот факт, что дилатационные воздействия могут приводить к возникновению и изменению во времени поля внутренних напряжений. Это влечет за собой существенное изменение кинетики деформирования и повреждения композитного материала при рабочих нагрузках.

Слабая освещенность в литературе вопросов, связанных с прогнозированием *снижения механических характеристик армированных тканью пластиков* в зависимости от дилатации структурных компонентов, вызванной воздействием влаги и термоциклирования указывает на недостаточную изученность данных вопросов и определяет актуальность их исследования.

Цель диссертации состоит в разработке методов расчета кинетики деформирования и разрушения армированных пластиков при квазистатическом кратковременном нагружении с учетом дилатационных факторов в начальный период процесса эксплуатации.

Научная значимость и новизна теоретических и экспериментальных результатов, полученных в данной диссертации, заключается в следующем.

1. Разработана мезомодель деформирования и разрушения тканевого композита с учетом дилатационных напряжений в компонентах микропластика. Мезомодель отличается от известных учетом геометрических особенностей переплетения нитей в тканевом монослое при проведении процесса гомогенизации.
2. Экспериментально исследовано влагопоглощение стеклопластиковыми с различными уровнями микроповреждений. По результатам экспериментов отмечено, что наличие *изломов* на кривой "напряжение-деформация" определяет границы диапазонов, в которых уровень предварительной нагрузки *не влияет* на характер влагопоглощения материала. Величина предельного влагосодержания исследованных материалов не зависит от уровня предварительного нагружения.



3. Предложен экспресс-метод, позволяющий значительно сократить время эксперимента, требуемое для определения констант влагопоглощения, путем использования образцов, предварительно растянутых до нагрузки, составляющей не менее 95% от разрушающей.
4. Экспериментально показано существенное влияние циклического знакопеременного температурного нагружения на изменение упругих характеристик тканевых армированных пластиков в состоянии предельного влагонасыщения за счет накопления рассеянных микрповреждений.
5. В методическом аспекте выявлено существенное влияние радиуса закругления опорных устройств на точность определения упругих констант армированного пластика при поперечном изгибе коротких балок по трехточечной схеме.

Практическая ценность работы состоит в следующем. Рассмотрены примеры технического использования стеклопластиков в конструкциях ветроэнергетических установок и втулок подшипников скольжения. Показано, что замена каплевидного поперечного профиля лопасти на листовую гнутый позволяет обеспечить в процессе производства повышение объемной доли арматуры, увеличение пределов прочности материала и независимость их от влажностной дилатации. Для подшипников скольжения рекомендовано использовать умеренное содержание волокон (40–50%) в материале, при котором влияние влажностной и тепловой дилатации будет создавать поле благоприятных микронапряжений и способствовать увеличению прочности материала при сжатии.

Общая методика исследований. Для решения поставленных в диссертации задач были использованы следующие методы:

- метод конечных элементов (МКЭ);
- методы теории вероятностей и математической статистики;
- экспериментальные методы определения механических свойств (методы статических испытаний);
- экспресс-метод определения параметров влагопоглощения армированных пластиков.

Достоверность полученных результатов обуславливается использованием апробированных экспериментальных и расчетных методов, а также сопоставлением полученных расчетных данных с известными экспериментальными.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и результаты исследований доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры “Прикладная механика и динамика и прочность машин” Южно-уральского государственного университета (Челябинск, 1998 – 2001 гг.), в работах XVIII, XX и XXI российской школы по проблемам проектирования неоднородных конструкций (Миасс, 1999 – 2001 гг.).

Публикации. Основное содержание диссертации и результаты исследований опубликованы в четырех работах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из 6 глав, трех приложений и списка литературных источников в составе 133 наименований, содержит 160 страниц текста, включая 65 рисунков и 20 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и дана общая характеристика работы.

В первой главе проведен обзор литературных источников по проблеме влияния дилатационных воздействий на механические свойства армированных пластиков.

Отмечено, что в настоящее время накоплен достаточно большой объем материала, посвященного деформированию и разрушению армированных пластиков с учетом дилатационных воздействий. Этой теме посвящены работы Аврасина Я.Д., Андриксона Г.А., Анискевича А.Н., Анискевич К.К., Асташкина В.М., Беллавина А.Д., Бертулиса Д.Р., Булманиса В.Н., Бэррера Р., Владимиров В.И., Гараниной С.Д., Герасимова А.А., Горбаткиной Ю.А., Горюшкина В.А., Гуняева Г.М., Давыдовой Н.Н., Жердева Ю.В., Журкова С.Н., Ивановой Н.К., Канярозе З.В., Кливилдзе В.И., Королева А.Я., Кривоноса В.В., Кристенсена Р., Кружковой Е.Ю., Кузьмина С.А., Куперман А.М., Курземниекса А.Х., Лапоткина В.А., Малкина А.Я., Машинской Г.П., Меркуловой В.М., Милютина Г.И., Молина В.И., Мумжиевой В.Г., Перова Ю.Ю., Поповой Н.С., Рыскина Г.Я., Скудры А.М., Старженецкой Г.А., Старцевой Л.Т., Тынного А.Н., Уржумцева Ю.С., Чалых А.Е., Шайдуровой Н.К., Янсона Ю.О., Chi-Hung S., Georg S., Halkias J.E., Homma Y., Karasawa M., Loos A.C., Masuko T., Mekague E.L., Menney D.R., Mompkins S.S., Reynolds J.D., Sandorff P.E., Springer S.C., Tajima Y.A., Unnam J. и других авторов. В ряде литературных источников отмечено, что для большинства армированных пластиков теми дилатационными факторами, которые оказывают наибольшее влияние на снижение механических характеристик этих материалов, являются температура, влага и химическая усадка связующего. Из современных армированных пластиков стеклопластики особенно чувствительны к перечисленным выше факторам.

Анализ литературных источников, изданных в России и за рубежом в 1980–2001 гг. показал, что воздействию температуры на прочность и деформативность армированных пластиков исследователи уделяли значительно больше внимания, чем воздействию влаги и усадки связующего. В большинстве случаев материалы, посвященные влиянию климатических факторов на механические свойства армированных пластиков, представляют собой *результаты узко направленных экспериментальных исследований материала как "черного ящика" с описанием отмеченных эффектов при помощи регрессионных зависимостей*, которые не являются универсальными и физически обоснованными.

Очевидно, что сложность и многопараметричность процессов, протекающих в волокнистых композитах при воздействии климатических факторов, не позволяют получить замкнутые *теоретические* решения. В связи с этим в расчетном плане представляются наиболее перспективными работы, направленные на *систематизированное* изучение дилатационных эффектов на микроуровнях и создание соответствующих *численных* микро- и мезомоделей деформирования и разрушения.

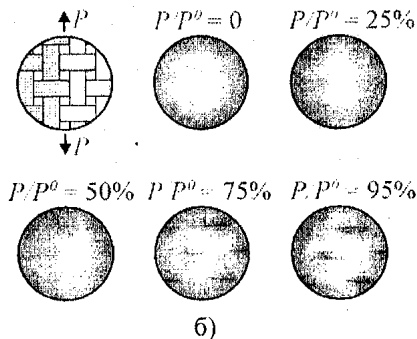
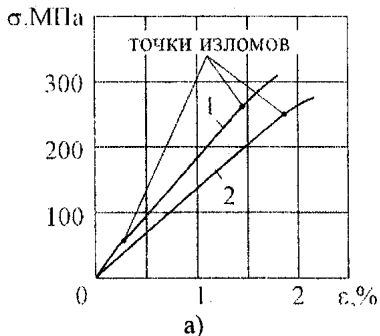
На основании выполненного обзора литературных источников в диссертации сформулированы следующие задачи:

1. Экспериментальное исследование влагопоглощения стеклопластиков с *различными уровнями начальных микроповреждений*.
2. *Сравнительный анализ* методов определения характеристик упругости армированных пластиков из испытаний коротких балок и квадратных пластин.
3. Экспериментальное исследование снижения характеристик упругости армированного пластика *при циклическом знакопеременном температурном нагружении*.
4. Прогнозирование кинетики деформирования и разрушения стеклопластиков с *тканевой арматурой* при кратковременном квазистатическом нагружении с учетом микронапряжений, возникающих в результате дилатации компонентов микропластика.

*Во второй главе* экспериментально исследована кинетика влагопоглощения стеклопластиков с *различным уровнем микроповреждений*.

Использованы образцы в виде полосок  $150 \times 15 \times 0,8$  мм из двух стеклопластиков (промышленного и лабораторного изготовления) с различными коэффициентами армирования, схемами переплетения нитей и типом связующего. Торцы образцов были защищены (покрыты слоем эпоксидного связующего).

Для создания в образцах различного уровня микроповреждений *предварительно осушенные* образцы были разделены на пять групп, четыре из которых были подвергнуты одноосному растяжению вдоль направления волокон. Максимальные значения растягивающей нагрузки  $P$  составили для каждой группы соответственно 95%, 75%, 50%, 25% от уровня разрушающей нагрузки  $P^0$ . Затем образцы в течение длительного периода времени (4 месяца) были выдержаны в климатической камере при температуре  $20^\circ\text{C}$ , где обеспечивалась 97–100% влажность воздуха. На рис. 1а показаны диаграммы растяжения вдоль волокон основы образцов в исходном (ненасыщенном влагой) состоянии, кривые влагонасыщения использованными материалами приведены на рис. 2а. Анализ результатов эксперимента показал, что использование диаграмм растяжения неповрежденного материала позволяет *предсказать диапазоны*, в которых уровень предварительной растягивающей нагрузки практически не влияет

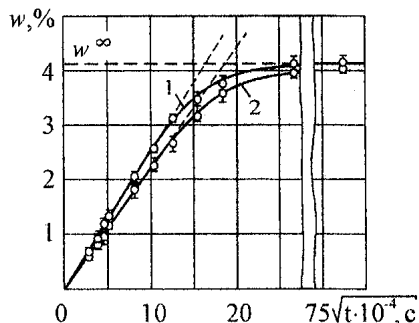


1 – промышленный стеклопластик; 2 – лабораторный стеклопластик.

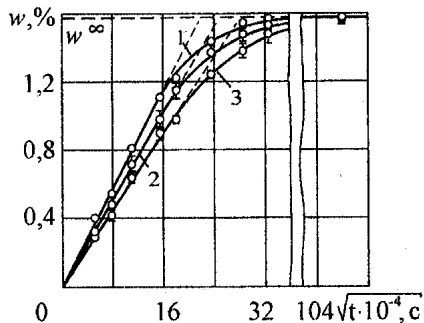
Рис.1

на характер сорбции влаги армированным пластиком. При растяжении тканевых композитов вдоль волокон основы или утка нелинейность кривой деформирования в значительной мере обусловлена возникновением в материале различного рода микрповреждений. В связи с этим предполагали, что “изломы”, наблюдаемые на кривых деформирования, являются показателями наиболее интенсивного роста микродефектов в объеме и на поверхности (рис.1.б) и могут служить границами искомых диапазонов.

Экспериментальное определение параметров влагопоглощения для пресованного при высоком давлении стеклотекстолита требует весьма длительного времени даже с учетом использования различного рода экспресс-методик. Однако, зная  $w_\infty$ , определение  $D$  возможно уже в первой фазе эксперимента. Поэтому для ускоренного определения  $w_\infty$  предложено использовать образец с высоким уровнем повреждений, например, образец, предварительно нагруженный до 95% от уровня разрушающей нагрузки. Использование такого образца



а) лабораторный стеклопластик  
1 –  $P/P^0=95\%$ ;  
2 –  $P/P^0=75\%, 50\%, 25\%, P=0$ .



б) промышленный стеклопластик  
1 –  $P/P^0=95\%$ ;  
2 –  $P/P^0=75\%, 50\%, 25\%$ ,  
3 –  $P=0$ .

Рис.2

позволяет сократить время эксперимента, требуемое для определения параметров влагопоглощения с использованием известных экспресс-методик, почти в два раза за счет увеличения *эффективной поверхности контакта* образца с влажной атмосферой.

*В третьей главе* с применением результатов численного эксперимента произведен *сравнительный анализ методов определения констант упругости армированных пластиков, полученных из испытаний коротких балок на изгиб и пласти на кручение* (Тарнопольский Ю.М. и др.). Расчеты напряженно-деформированного состояния выполнены МКЭ на примере типичного эпоксифенольного стеклопластика при известных точных значениях характеристик упругости материала.

Методика испытаний коротких балок на изгиб не учитывает возможное сползание образца с опор и влияние локальных деформаций материала в зонах контакта с опорами и нагружающим элементом. Поэтому в диссертационной работе не использовали гипотезу голономности связей. С этой целью была решена *геометрически нелинейная контактная задача* теории упругости ортотропного тела. В расчете варьировали радиус закругления опор (минимальный радиус равен  $1/8$  толщины образца  $h$ , максимальный равен  $1,5h$ ).

Анализ результатов показал, что типовая методика позволяет определять с точностью, достаточной для технических приложений лишь модуль упругости стеклопластика. Погрешность определения модуля сдвига значительно выше по сравнению с погрешностью определения модуля упругости. Для стеклопластика в исходном состоянии она составляет около 20%. Причем радиус закругления контактной поверхности опор практически не влияет на точность определения модуля сдвига. Однако при снижении сдвиговых характеристик материала точность определения модуля сдвига возрастает. При этом использование минимального радиуса опор позволяет еще почти в два раза снизить погрешность определения модуля сдвига.

Известный метод кручения квадратных пластин, опертых по трем углам, используемый для определения модуля сдвига армированных пластиков, не учитывает наличие *смещения точек опирания* образца при проведении испытаний. Расчетом МКЭ установлено, что это смещение оказывает существенное влияние на величину прогиба в точке нагружения пластины и, как следствие, на вычисляемый с помощью этого перемещения модуль сдвига. Однако введение поправочного коэффициента, полученного расчетом, позволило исключить систематическую погрешность этого метода и обеспечить необходимую точность определения модуля сдвига.

*В четвертой главе* экспериментально исследовано *снижение упругих характеристик* (продольного модуля упругости и внутрислойного модуля сдвига) *предельно насыщенного влагой армированного пластика при циклическом знакопеременном температурном воздействии* в результате накопления мик-



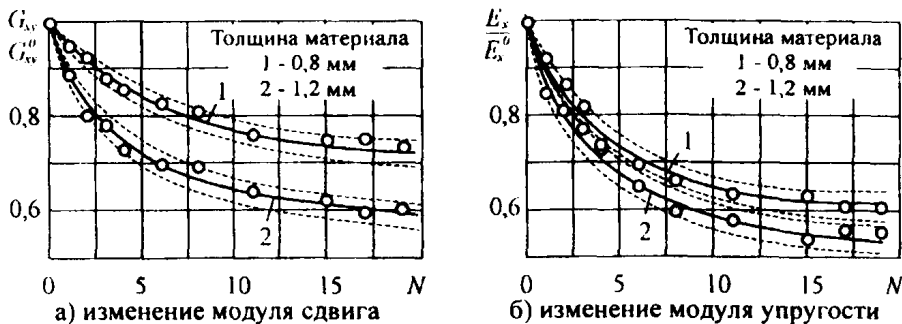


Рис.3

роповреждений. Процесс роста микрповреждений предельно насыщенного влагой композита при циклическом замораживании может быть объяснен фазовыми превращениями воды в микротрещинах композита.

Каждый цикл замораживания предельно насыщенного влагой образцов включал в себя две операции: замораживание и последующее дополнительное влагонасыщение. Замораживание образцов производилось в морозильной камере в течение 30–40 мин при температуре  $-10^{\circ}\text{C}$ , влагонасыщение – в климатической камере в течение суток при температуре  $17-20^{\circ}\text{C}$  и влажности воздуха 95–100%.

На рис.3 показано снижение продольного модуля упругости и внутрислойного модуля сдвига предельно насыщенного влагой стеклотекстолита марки СТЭФ-1 в зависимости от числа термоциклов с переходом через  $0^{\circ}\text{C}$  (на рис.3 точки показывают средние значения упругих констант по результатам трех независимых испытаний, сплошные линии – аппроксимации, пунктирные – доверительные интервалы). Здесь верхний индекс 0 соответствует исходному состоянию материала.

Внутрислойный модуль сдвига предельно насыщенного влагой материала снизился на 30...40% за 20 термоциклов, а продольный модуль упругости на 40...50% по сравнению с начальными величинами.

*В пятой главе разработана мезомодель деформирования и разрушения тканевых композитов с учетом напряжений в микропластике, возникающих в результате дилатации компонентов материала. Для этого с помощью МКЭ на примере типичного эпоксифенольного стеклопластика решены следующие задачи:*

1. Исследована зависимость трансверсального коэффициента диффузии микропластика от коэффициента армирования.
2. Проведен расчет напряженного состояния элементов микропластика при насыщении влагой.

1. *Трансверсальный коэффициент диффузии* стеклопластика. Модель и результаты расчета приведены на рис.4, 5 (точки и пунктирные линии – расчет с помощью МКЭ). Полученная зависимость относительных коэффициентов диффузии в диапазоне реальных объемных долей волокон ( $v < 0,75$ ) была аппроксимирована прямой линией, показанной на рис.5 цифрой 1

$$D(v) = D_m \cdot (1 - 0,9 \cdot v),$$

где  $D$  – коэффициент диффузии армированного пластика,  $D_m$  – коэффициент диффузии связующего,  $v$  – объемная доля волокон.

Полученное выражение было сопоставлено с формулой Р. Кристенсена для определения коэффициента теплопроводности путем использования влаготепловой аналогии (кривая 2 на рис.5). Эта зависимость получена с использованием большого числа допущений и не позволяет вычислять коэффициент диффузии материала с высоким содержанием волокон с точностью, достаточной для инженерных приложений. Расчет МКЭ показал, что влагопроводность армированных пластиков с непроводящей арматурой поперек волокон слабо отличается от влагопроводности вдоль волокон. Поэтому такой материал в первом приближении можно считать изотропным.

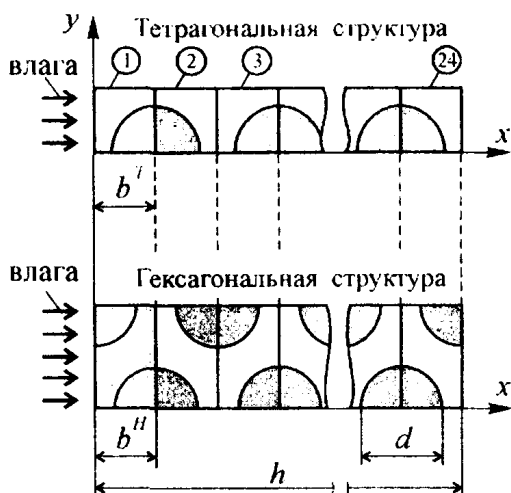


Рис.4

## 2. Радиальные напряжения на границе раздела волокно-матрица.

Рассмотрены два случая: с учетом и без учета реологических свойств матрицы. В первом случае (упругий расчет) напряжения предельно насыщенного влагой материала были вычислены с использованием модели, изображенной на рис.6.

На рис.7 точками показаны относительные величины средних радиальных напряжений на границе волокно-матрица  $\bar{\sigma}_r$ , вычисленные с помощью МКЭ в зависимости от объемной доли волокон. Здесь же сплошными линиями показаны варианты решения задачи теории упругости о нахождении радиальных напряжений, возник-

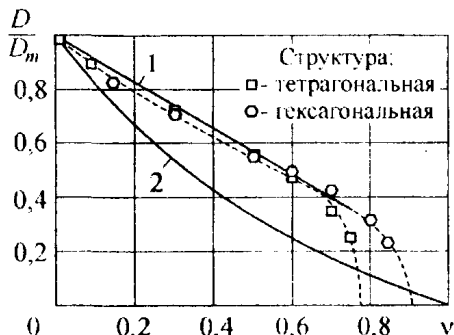
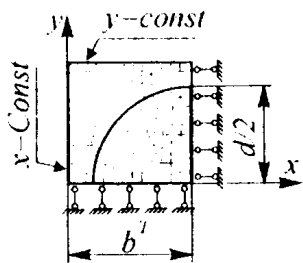
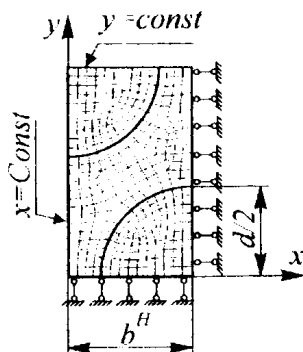


Рис.5



а) тетрагональная ячейка



б) гексагональная ячейка

Рис.6

к различию между реальным и вычисленным значением до 70% в рассмотренном временном интервале.

*Расчет диаграмм деформирования и разрушения однонаправленных армированных пластиков при трансверсальном и сдвиговом видах нагружения с учетом дилатации компонентов.*

Разработана дискретная модель (набор элементарных ячеек), учитывающая распределение локальных предел прочности матрицы по нормальному закону и известные осредненные величины радиальных напряжений, возникающих на границе волокно-матрица в ячейках от насыщения влагой.

Использованы следующие до-

кающих при влагонасыщении (по аналогии с нагревом) на границе раздела двух разнородных коаксиальных цилиндров, находящихся в состоянии плоской деформации (деформация цилиндров в осевом направлении равна нулю).

Микронапряжения от влагонасыщения армированного пластика с учетом ползучести связующего (второй расчет) были вычислены с использованием модели, приведенной на рис.8, в которой реологические характеристики матрицы были определены на основе известных экспериментальных данных А.Н. Анискевича.

На рис.9 показано изменение величины среднего радиального напряжения  $\bar{\sigma}_r$  с течением времени, вычисленное с учетом и без учета ползучести. Величина  $\bar{\sigma}_r^*$  представляет собой среднее радиальное напряжение на границе раздела волокно-матрица, вычисленное без учета ползучести,  $n$  – номер ячейки монослоя.

Расчеты показали, что реологические свойства связующего оказывают значительное влияние на изменение средних радиальных напряжений на границе раздела фаз. Неучет реологии связующего при вычислении этих напряжений может приводить к



Рис.7

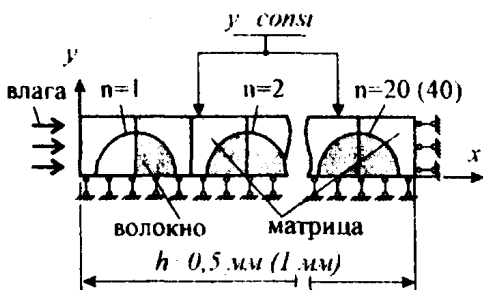


Рис.8

а для расчета кривой деформирования материала при межслойном сдвиге использована гипотеза локальной идеальной пластичности. Согласно предложенной модели при трансверсальном нагружении монослоя, разрушение каждой ячейки происходит от действия микронапряжений на границе раздела волокно-матрица, причем местные напряжения выше средних в  $\alpha$  раз, где  $\alpha$  – коэффициент концентрации напряжений. Ячейка материала считается разрушившейся, если указанные местные напряжения в ней достигли предела прочности, при этом жесткость ячейки приравнивается к нулю. Напряжения в предельно насыщенной влагой ячейке вычислены следующим образом

$$\sigma = \sigma^0 + \bar{\sigma}_r,$$

$$\sigma^0 = f(d, \nu, E_T, \alpha, U), \quad \bar{\sigma}_r = f(d, \nu, E_m, E_f, \mu_m, \mu_f, D_m, D_f, w_m, w_f, U),$$

$$E_T = f(E_m, E_f, \nu), \quad \alpha = f(k_\alpha, \nu), \quad k_\alpha = E_m / E_f,$$

здесь  $\sigma$  – максимальное напряжение в насыщенной влагой ячейке;  $\sigma^0$  – максимальное напряжение в ненасыщенной влагой ячейке (в исходном состоянии);  $\bar{\sigma}_r$  – средняя величина радиального напряжения на границе раздела волокно-матрица;  $E_T$  – трансверсальный модуль упругости ячейки;  $E_m, E_f$  – модули упругости;  $\mu_m, \mu_f$  – коэффициенты Пуассона;  $D_m, D_f$  – коэффициенты диффузии,  $w_m,$

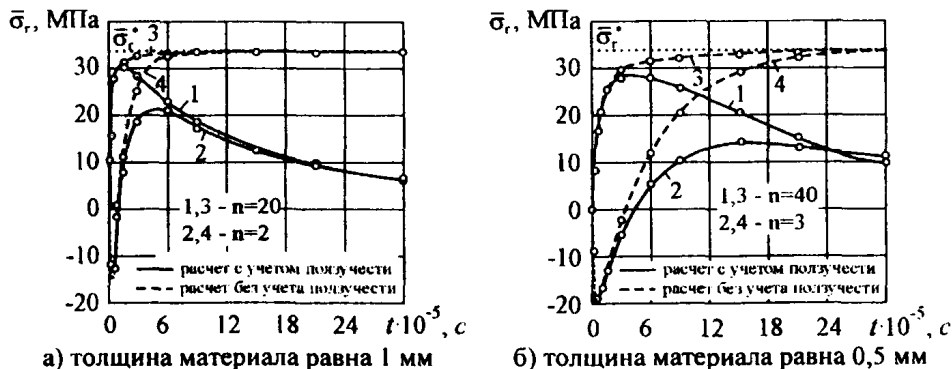


Рис.9

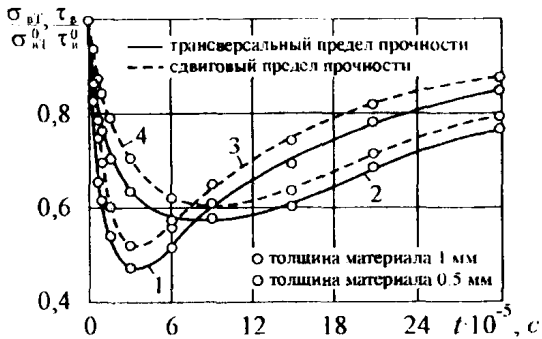


Рис.10

в насыщенной влагой ячейке;  $\tau^0$  – касательное напряжение в ненасыщенной влагой ячейке (исходное состояние);  $k_{mp}$  – константа материала (коэффициент межфазного трения), определенная при различных температурах из испытаний на сдвиг;  $G_m$  – модуль сдвига матрицы. Если касательные напряжения в ячейке достигли локального предела текучести  $\tau_v$ , то далее они не меняются и остаются равными  $\tau_v$ .

На рис.10 приведены графики, отражающие зависимости пределов прочности стеклопластикового монослоя при трансверсальном и сдвиговом видах нагружения от времени экспозиции во влажной среде. Введены следующие обозначения:  $\sigma_{сГ}^0$ ,  $\tau_{сГ}^0$  – трансверсальный и сдвиговый пределы прочности материала соответственно в начальном (сухом) состоянии (для рассматриваемого стеклопластика  $\sigma_{сГ}^0=30,1$  МПа,  $\tau_{сГ}^0=44,2$  МПа),  $\sigma_{сГ}$  и  $\tau_{сГ}$  – пределы прочности, изменяющиеся в зависимости от влагонасыщения материала.

Расчеты показали, что поглощение влаги стеклопластиком приводит к снижению его прочностных свойств. Наиболее интенсивно прочность материала снижается на начальном этапе влагонасыщения, затем можно наблюдать некоторое восстановление прочности, что связано, очевидно, с перераспределением микронапряжений вследствие их релаксации.

### Модель деформирования и разрушения тканевого армированного пластика.

Разработанная модель учитывает геометрию переплетения нитей (искривленность) и использует модель микропластика, разработанную выше для расчета кинетики деформирования и разрушения.

При схематизации типичного монослоя тканевого армированного пластика, схема которого изображена на рис.11, замена изогнутых участков нитей (волокон) прямолинейными участками осуществлена, как показано на рис.12. Согласно разработанной модели, монослой представлен в виде двух последова-

но – величины предельного влагосодержания,  $U$  – параметр деформирования. Индексы  $m$  и  $f$  указывают на соответствие параметра материалу связующего или волокна.

В случае расчета кривой сдвига монослоя армированного пластика напряжения в предельно насыщенной влагой ячейке представляют собой следующее

$$\tau = \tau^0 + k_{mp} \cdot \bar{\sigma}_r, \quad \tau^0 = f(G)$$

где  $\tau$  – касательное напряжение

тельно соединенных блоков, каждый из которых содержит несколько параллельно соединенных ячеек (рис.13). Каждая ячейка представляет собой однонаправленный композит (микропластик) с различной ориентацией волокон. Таким образом, для прогнозирования деформирования и разрушения армированной тканью пластика достаточно знать геометрию переплетения нитей и механические характеристики микропластика с теми же структурными компонентами (волокнами и связующим).

При расчете последовательного соединения первого и второго блоков ячеек (рис.13) общие деформации монослоя  $\epsilon$  вычислены следующим образом

$$\epsilon = \frac{k_L \cdot \epsilon^{(1)} + \epsilon^{(2)}}{k_L + 1},$$

$$\epsilon^{(1)} = f(E_L^i, E_T^i, G_{LT}^i, \mu_L^i, N, \varphi),$$

$$\epsilon^{(2)} = f(E_L^i, E_T^i, G_{LT}^i, \mu_L^i, N),$$

$$k_L = L_1/L_2, \quad i=1 \dots 8,$$

здесь  $\epsilon^{(1)}$  – общие деформации первого блока;  $\epsilon^{(2)}$  – общие деформации второго блока;  $i$  – номер ячейки;  $E_L$ ,  $E_T$  и  $G_{LT}$  – секущие модули материала ячеек в направлении осей  $L$ ,  $T$  и сдвиговый  $LT$ ;  $\mu_L$  – коэффициент Пуассона;  $N$  – единичное усилие;  $\varphi$  – угол наклона участка нитей монослоя.

Секущие модули ячеек зависят от накопленных повреждений материала  $W$

$$E_L = E_L^0(1 - W_L), \quad E_T = E_T^0(1 - W_T),$$

$$G_{LT} = G_{LT}^0(1 - W_{xy}), \quad \mu_L = \mu_L^0(1 - W_L).$$

Искривленность нитей при деформировании материала в направлении оси  $L$  (основа или уток) вызывает в ней появление дополнительных на-

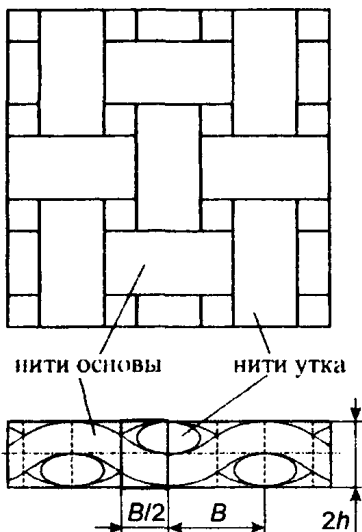


Рис.11

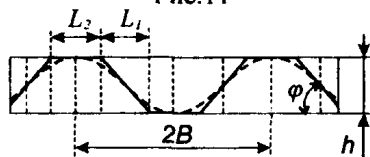


Рис.12

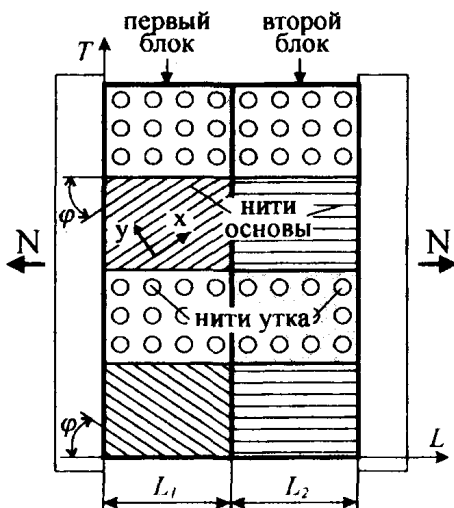
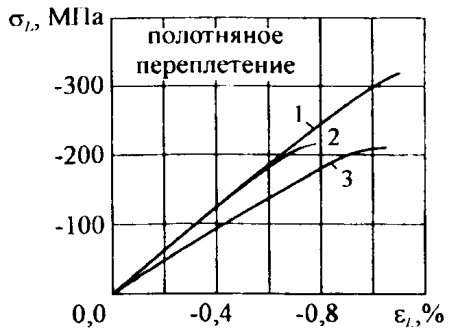
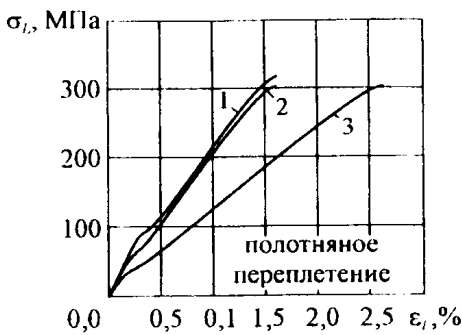


Рис.13



1 – материал в исходном состоянии;

2 – в результате дилатации изменились величины трансверсального и сдвигового пределов прочности материала;

3 – изменились величины трансверсального и сдвигового пределов прочности материала, а также изменились модули упругости и сдвига в результате знакопеременного термоциклирования

а) растяжение вдоль волокон

б) сжатие вдоль волокон

Рис. 14

пряжений изгиба. Форма нити схематизирована функцией вида  $f(X) = C \cos\left(\frac{\pi X}{A}\right)$ . При этом максимальные напряжения в ячейке  $\sigma$ , от которых зависит уровень поврежденности материала  $W$ , представлены в виде суммы напряжений  $\sigma^p$ , возникающих при растяжении нити, и напряжений  $\sigma^u$ , вызванных ее изгибом

$$\sigma = \sigma^p + \sigma^u, \quad \sigma^u = E_L \cdot \varepsilon^u,$$

$$\varepsilon^u = 1 - \frac{\rho}{\rho_1} \cdot \frac{\rho_1 + 0,5h}{\rho + 0,5h}, \quad \rho = A^2 / (C \cdot \pi^2), \quad \rho_1 = A_1^2 / (C_1 \cdot \pi^2).$$

Параметры зависимости  $f(X)$  до деформации  $A = 0,5B$ ,  $C = h$ , после деформации  $A_1 = 0,5B(1 + \varepsilon_l)$ ,  $C_1 = h(1 + \varepsilon_T)$ , где  $\varepsilon_l$  и  $\varepsilon_T$  – деформации ячейки вдоль и поперек волокон соответственно.

С использованием описанной модели разработана программа для ЭВМ на языке Паскаль 7.0, позволяющая рассчитывать кривую деформирования тканевого армированного пластика при одноосном напряженном состоянии с учетом накопления рассеянных по объему микрповреждений. На рис.14 показано, что предел прочности на сжатие вдоль волокон снижается на 30%, а предел прочности на растяжение – на 5%. Снижение модулей упругости материала в результате знакопеременного термоциклирования приводит к росту нелинейной составляющей на диаграмме деформирования, как при растяжении, так и при сжатии. Вместе с тем можно отметить, что величины разрушающих деформаций при растяжении увеличились почти на 75%, а при сжатии практически не изменились.

В шестой главе рассмотрены примеры технического использования результатов работы для расчета армированных тканью пластиков, подверженных дилатационным воздействиям. В частности, произведена оценка прочности лопасти ветроэнергетической установки при нагружении порывом ветра и полимерной втулки подшипника скольжения при действии радиальной нагрузки.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработаны модели разрушения и деформирования *однонаправленных* армированных пластиков при квазистатическом однократном нагружении с учетом микронапряжений, возникающих в результате дилатации структурных компонентов материала (связующего и волокон) в начальный период эксплуатации. Показано, что начальные микронапряжения на границе раздела волокно-матрица практически линейно зависят от объемного коэффициента армирования  $V$  и оказывают существенное влияние на прочностные свойства типичных армированных пластиков при трансверсальном и сдвиговом нагружении ( $\nu=0,3-0,5$ ).

2. На основе полученных данных об изменении прочностных свойств *однонаправленных* монослоев разработана модель деформирования и разрушения *тканевых* армированных пластиков. Показано, что у стеклотекстолита СТЭФ-1 при предельном влагонасыщении предел прочности на сжатие вдоль волокон снижается на 30%, а предел прочности на растяжение – на 5%. При снижении модулей упругости материала (в результате знакопеременного термоциклирования) происходит изменение характера деформирования, как при растяжении, так и при сжатии. Величины разрушающих деформаций при растяжении увеличились на 75%, а при сжатии практически не изменились.

3. Проведено экспериментальное исследование влагопоглощения материалов (СТЭФ-1 и стеклопластика лабораторного изготовления) с различными уровнями микроповреждений, обусловленными предварительным деформированием. Наличие изломов на кривой деформирования определяет границы диапазонов, в которых уровень предварительной нагрузки не влияет на характер влагопоглощения материала. Величина предельного влагосодержания исследованных стеклопластиков не зависит от уровня предварительного нагружения. Использование предварительного растяжения образцов до нагрузки, составляющей более 95% от разрушающей, позволяет вдвое сократить время эксперимента, требуемое для определения констант влагопоглощения.

4. Экспериментально исследовано снижение упругих характеристик предельно насыщенного влагой стеклопластика СТЭФ-1 при циклическом знакопеременном температурном нагружении. По результатам испытаний можно отметить, что у эпоксидных стеклопластиков тенденция к снижению упругих характеристик в результате указанного воздействия существенна. Внутрислойный модуль сдвига предельно насыщенного влагой материала снизился на



30...40% за 20 термоциклов, а продольный модуль упругости на 40...50% по сравнению с начальными величинами.

5. Проведена оценка точности результатов определения упругих характеристик армированных пластиков из испытаний коротких балок на изгиб по трехточечной схеме и на кручение квадратных пластин с использованием результатов численного эксперимента при известных точных значениях характеристик упругости материала образца.

Показано, что рассмотренные методы позволяют определять модуль упругости и модуль сдвига стеклопластика с погрешностью не хуже 5% с использованием найденных поправочных коэффициентов.

6. Рассмотрены примеры технического использования армированных тканью пластиков в конструкциях ветроэнергетических установок и втулок подшипников скольжения. Показано, что замена каплевидного поперечного профиля лопасти на листовую гнутый позволяет обеспечить повышение объемной доли арматуры, характеристик прочности материала и независимость их от влажностной дилатации. Для подшипников скольжения рекомендовано использовать умеренное содержание волокон 40–50%, при котором влияние влажностной и тепловой дилатации будет создавать поле благоприятных самоуравновешенных микронапряжений.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В РАБОТАХ**

1. Щербакова А.О., Сапожников С.Б. Влияние радиуса закругления опор на точность определения модуля сдвига армированных пластиков. // Механика композитных материалов.– Т.37, № 2, 2001, с. 414...418.
2. Сапожников С.Б., Щербакова А.О. Влияние влаги на напряженное состояние границы раздела волокно-матрица в армированном пластике. // Известия ЧНЦ УрО РАН (раздел механика), вып. №2, июнь 2001, 5 стр.
3. Щербакова А.О. Влияние дилатационных воздействий на прочность армированных пластиков. // XXI Российская школа по проблемам науки и технологий (тезисы докладов, г. Миасс), 2001, с. 19.
4. Щербакова А.О. Экспериментальное исследование влагопоглощения поврежденных стеклопластиковых образцов. // XIX Российская школа по проблемам науки и технологий (тезисы докладов, г. Миасс), 1999, с. 11.