

6
A-52

АКАДЕМИЯ НАУК ЛАТВИЙСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ ПОЛИМЕРОВ

На правах рукописи

К а л и н к а Юрис Албертович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
СТЕКЛОПЛАСТИКА, АРМИРОВАННОГО
КОРОТКИМИ ВОЛОКНАМИ**

01.02.03 — Сопротивление материалов
и строительная механика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

РИГА — 1973

АКАДЕМИЯ НАУК ЛАТВИЙСКОЙ ССР

ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ ПОЛИМЕРОВ

На правах рукописи

КАЛИНКА Юрис Албертович

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТЕКЛОПЛАСТИКА,
АРМИРОВАННОГО КОРОТКИМИ ВОЛОКНАМИ

01.02.03 - Сопротивление материалов и
строительная механика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рига - 1973



Работа выполнена на кафедре сопротивления материалов и в отраслевой лаборатории "Прикладные методы расчета резино-технических изделий" Рижского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Э.Э. ЛАВЕНДЕЛ

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор А.М. СКУДРА
доктор технических наук, профессор И.З. ПАЛЛЕИ

Ведущее предприятие – Всесоюзный научно-исследовательский институт стеклопластиков и стекловолокна (Московская обл. ст. Крюково)

Автореферат разослан "17" МАЯ 1973 г.

Защита диссертации состоится "22" ИЮНЯ 1973 г. в 10⁰⁰ часов на заседании Ученого совета Института механики полимеров АН Латвийской ССР по адресу: Рига, ул. Айзкрауклес, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института механики полимеров АН Латв. ССР.

Ученый секретарь Совета
к.т.н. Р.Д. МАКСИМОВ



Композиционные материалы, обладающие различными физическими свойствами, широко используются в современной технике. Надлежащий выбор свойств компонентов, их относительного содержания и структуры композита позволяет получать новые материалы, сочетающие необходимую прочность и жесткость с другими ценными качествами: сравнительно малым удельным весом, стойкостью по отношению к агрессивным средам, малой теплопроводностью, высокими электроизоляционными свойствами и т.п. Среди композиционных материалов особое место занимают материалы, армированные волокнами. Обычно это двухкомпонентные композиционные материалы, один из компонентов которых – арматура в виде тонких высокопрочных волокон – обеспечивает прочность и жесткость системы, второй компонент – матрица – создает монолитность и формуемость материала, а также служит для передачи нагрузки волокнам. К числу наиболее распространенных армированных материалов относятся стеклопластики, которые благодаря высокой механической прочности, относительной легкости и высокой термостойкости широко применяются почти в каждой отрасли народного хозяйства.

Успешно разрабатываются и другие композиционные материалы. На основе полимерных связующих создаются материалы, в которых в качестве армирующих элементов используются волокна бора, углерода, керамических веществ и высокопрочностных монокристаллов – усов.

Из общего множества композиционных сред можно выделить группу материалов, армированных прерывными короткими волокнами. Это такие материалы как, например, пластики, армированные усами, термопласты и реактопласты, наполненные рубленными стекловолокнами, армированные волокнами металлы и др. Композиционные материалы, армированные короткими волокнами, по прочностным и деформационным свойствам приближаются к композициям, армированным непрерывными волокнами, если только короткие волокна возможно уложить в одном направлении, если их длина достаточна для передачи касательных напряжений и если имеется надежная связь между волокнами и мат-

рицей. Стеклопластики с хаотическим расположением коротких армирующих волокон превосходят анизотропные по объему промышленного производства, чему способствует возможность использования наиболее прогрессивных технологических процессов их переработки в изделия. Кроме того, некоторые высокопрочные армирующие материалы можно получить только конечной длины. Многие композиционные материалы, армированные волокнами конечной длины, еще находятся в стадии разработки.

В связи с широким распространением стеклопластиков в настоящее время разрабатывается теория их деформирования и разрушения. Необходимость разработки такой теории дополнительно усиливается тем, что свойства материала могут назначаться в процессе проектирования. Теория, таким образом, нужна не только для расчета конструкций из заданного материала, но и для разработки рекомендаций химикам по выбору необходимых свойств компонентов при проектировании новых материалов.

К числу наиболее разработанных вопросов относится теория упругих свойств стеклопластиков, армированных непрерывными волокнами. В меньшей степени разработана теория деформирования и разрушения композиционных материалов, армированных прерывными направленными волокнами и композитов со стохастической структурой. Недостаточное знание прочностных и деформативных свойств композиционных материалов, отсутствие надежных методов расчета влечет за собой конструирование армированных пластиков и деталей из них эмпирическими методами.

Настоящая диссертация посвящена прогнозированию некоторых физико-механических свойств стеклопластика, армированного короткими, хаотически (в плоскости) расположенными волокнами при одноосном растяжении.

Диссертация состоит из пяти глав. В первой главе дается обзор литературы и постановка задачи. Обсуждаются работы, посвященные изучению особенностей механического поведения полимерных связующих и армирующих материалов (А.П.Александров, А.Ю.Ишлинский, Ю.Н.Работнов, А.А.Илюшин, П.М.Огибалов, Т.Алфрей, А.К.Малмейстер, В.П.Тамуж, Г.А.Тетерс, Н.Н.Малинин, А.Р.Ржаницин, М.И.Розовский, М.А.Колтунов, В.А.Каргин и др.). Стеклопластики с регулярной

структурой подробно изучены в работах В.Д.Бидермана, В.В.Болотина, Ю.Н.Работнова, С.В.Серенсена, А.М.Скудры, Ю.М.Тарнопольского, А.П.Рабиновича, Г.А.Ван Фо Фы и др. авторов. Статистическая оценка прочности армированных пластиков применена в работах Я.Немца, С.В.Серенсена, В.С.Стреляева, С.Д.Волкова и др. Подробнее обсуждается литература, посвященная композиционным материалам, армированным волокнами конечной длины (Р.Крок, Л.Браутман, Б.Розен, З.Хашин, Р.Хилл, К.Цвебен, С.Цай, А.Келли, Х.Конвей, Е.Эшелби, Х.Кортен, Б.Ю.Трифель, Ю.М.Малинский, А.В.Мотавкин и др.).

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию механических характеристик композиционного материала - стекловолокниста ДСВ-2-Р-2М, разработанного во Всесоюзном научно-исследовательском институте стеклопластиков и стекловолокна. Исследован материал с различной схемой армирования: хаотически наполненный и с параллельно расположенными короткими волокнами. Испытывались плоские образцы с однонаправленной укладкой армирующих элементов под различными углами к внешней растягивающей нагрузке. Проведены также испытания отдельных компонентов: полимерного связующего - фенолоформальдегидной смолы Р-2М, армирующих элементов и их взаимного сцепления на сдвиг. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что в первом приближении компоненты композиционного материала можно считать упругими телами.

Хаотически армированный материал представлен состоящий из плоских, параллельно расположенных элементарных слоев. Каждый элементарный слой армирован однонаправленными параллельными короткими волокнами. В разных слоях армирующие элементы - дискретные волокна - однонаправленно ориентированы под различными углами к направлению внешней растягивающей нагрузки. Распределение угла ориентации равновероятно. Слои деформируются совместно, взаимным влиянием слоев пренебрегаем. Предлагаемая модель представляет материал, армированный хаотически в параллельных плоскостях. Обычно из стекловолокнистов изготавливают тонкостенные детали, толщиной меньше длины армирующих элементов. Поэтому в первом приближении можно принять, что полученный материал армирован хаотически в параллельных плоскостях.

Для определения механических свойств хаотически армированного материала отдельно исследуются элементарные слои, из кото-

рых состоит материал. Изучение однонаправленно армированного слоя имеет также и самостоятельное значение, так как может быть использовано для теоретических исследований основных механических свойств композиционных материалов, армированных короткими, параллельно расположенными волокнами.

В качестве наименьшего элементарного объема, представляющего еще физические и механические свойства однонаправленно армированного материала, предлагается короткое волокно, охваченное полимерной матрицей. Такая упрощенная модель подвергается растяжению вдоль волокна, растягивающие усилия приложены к полимерной матрице. В основе модели элементарного объема лежат гипотезы о том, что полимерная матрица работает на растяжение и сдвиг, а армирующее волокно — только на растяжение, усилия в компонентах модели пропорциональны разности перемещений точек на оси симметрии стекловолокна и матрицы и оба компонента следуют закону Гука. Решается система дифференциальных уравнений для точек на продольной оси стекловолокна и полимерной матрицы. Дифференциальные уравнения содержат константы и параметры, зависящие от механических свойств материала. Для уточнения константы материала, определяющей жесткость сдвига модели элементарного объема, необходимо использовать экспериментальные данные. Рассмотрены три возможных варианта разрушения композиции: 1/ разрушение произойдет вследствие разрушения стекловолокна, 2/ разрушение начинается вследствие разрушения полимерного связующего, 3/ причиной разрушения композиции является разрушение адгезионной связи между компонентами.

Чтобы учесть влияние рядом расположенных коротких армирующих волокон на картину распределения напряжений, рассматривается расчетная модель, состоящая из трех рядов армирующих элементов: центрального сплошного волокна, представляющего элементарный объем, и двух соседних рядов прерывных волокон. Между волокнами находятся слои полимерной матрицы. Основные предположения и гипотезы приняты такими же как и в модели элементарного объема. Длина модели равна длине короткого волокна. Распределение напряжений исследуется при растяжении в направлении оси волокон. Для определения нормальных и касательных напряжений в компонентах модели составляется система дифференциальных уравнений. Задача

одномерная и рассматривается в упругой постановке. Число дифференциальных уравнений определяется числом параллельных рядов стекловолокон и слоев полимерной матрицы в конкретном случае. Разрывы волокон разделяют расчетную модель на три участка и для определения констант интегрирования необходимо решить систему из 36 линейных алгебраических уравнений, полученных из граничных условий и условий непрерывности напряжений и перемещений. Задача решалась на ЭВМ. Несмотря на то, что задача решается в упругой постановке, полученные результаты способствуют выяснению основных закономерностей передачи усилий коротким стекловолоконкам, концентрации и распределению напряжений в полимерной матрице и армирующих элементах, а также исследованию влияния взаимного расположения коротких волокон на распределение нормальных и касательных напряжений. Схематически расчетная модель длиной, равной длине армирующего элемента, и распределение напряжений в компонентах модели показано на рис. I; I — модель, II — растягивающие напряжения в стекловолокнах, III — растягивающие напряжения в слоях полимерной матрицы, IV — касательные напряжения в матрице, V — перемещения в стекловолокне сI. Ряды стекловолокон обозначены с1, с2, с3, а слои полимерной матрицы: п1, п2, п3. Из рис. I видно, что концы волокон существенно влияют на картину распределения напряжений только в соседних слоях матрицы, контактирующих с дискретными стекловолоконками, и увеличение числа параллельных рядов армирующих элементов не позволяет получить качественно новые результаты.

В модели, состоящей из трех рядов армирующих элементов, центральное волокно с соседними слоями матрицы можно рассматривать как элементарный объем, но уже с учетом влияния подобных элементарных частиц, находящихся рядом и сдвинутых относительно центрального волокна. Следующим шагом является изучение элементарного объема, который охвачен подобными элементарными объемами, находящимися не только рядом, но и в торцах. Предлагается расширенная расчетная модель, состоящая по длине из трех коротких армирующих элементов, позволяющая определить взаимное влияние армирующих элементов, расположенных в продольном направлении и исключить влияние граничных условий на средний элементарный объем.

С увеличением числа армирующих элементов соответственно уве-

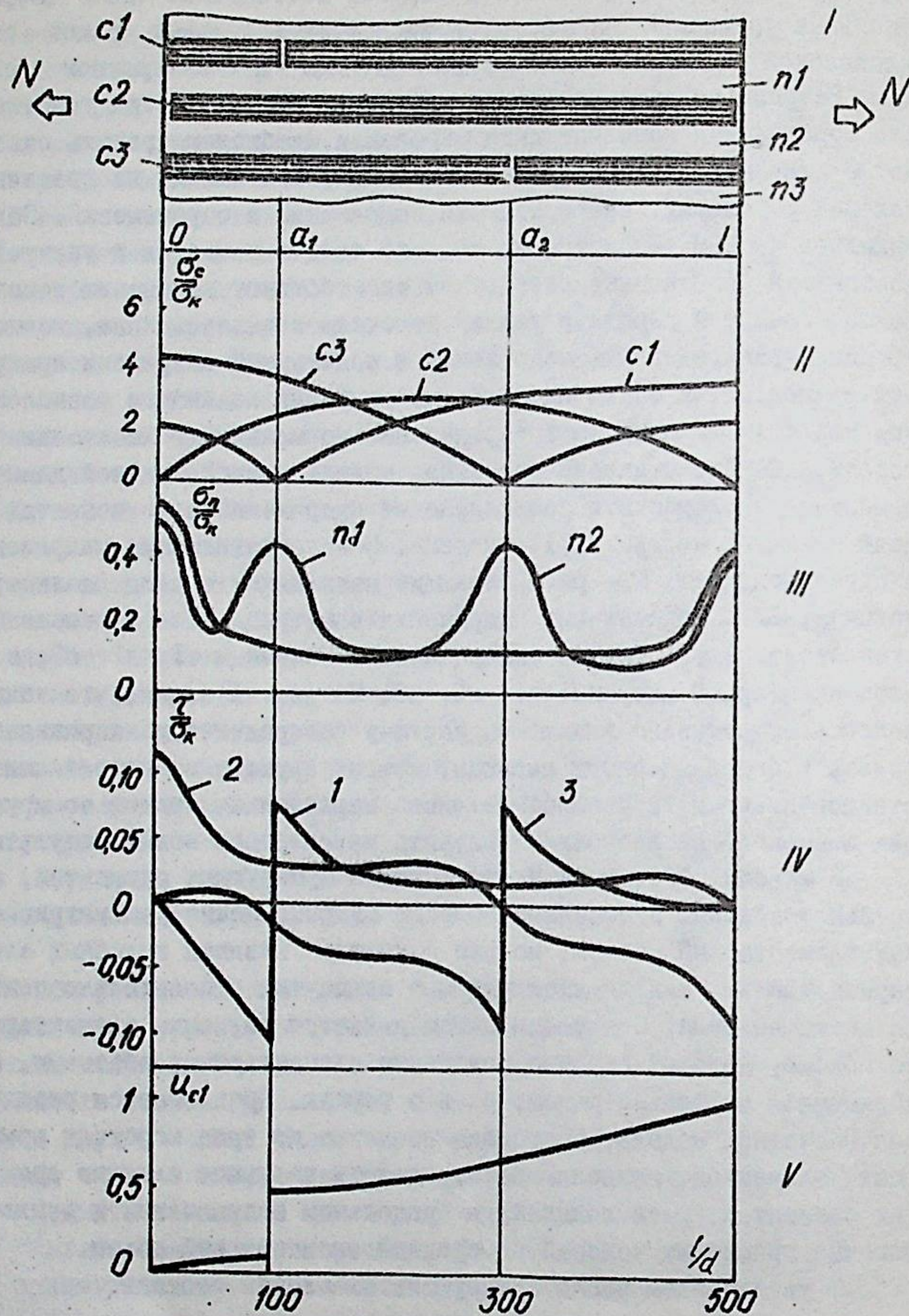


Рис. I. Модель и результаты исследования концентрации напряжений для однонаправленно армированного слоя.

личивается число участков, где необходимо определять свои константы интегрирования. Для их определения решалась система из 108 линейных алгебраических уравнений. Полученное численное решение позволяет определить перемещения и напряжения в отдельных компонентах. Модели однонаправленно армированного слоя, учитывают влияние поперечно и продольно расположенных коротких армирующих элементов на распределение нормальных и касательных напряжений.

В целях экспериментальной проверки результатов, полученных на расчетных моделях, изготовлены образцы, подобные расчетным моделям. Образцы для проверки модели элементарного объема состоят из одного армирующего элемента - круглого металлического стержня, диаметром 8 мм и длиной 160 мм, который "плавает" в полиэфирной смоле. Образец подвергался растяжению в продольном направлении, по измеренным деформациям определялись напряжения в стержне и сравнивались с теоретически полученной эпюрой напряжений.

Чтобы выяснить, как модель однонаправленно армированного элементарного слоя описывает композиционный материал, сопоставлялись следующие теоретические и экспериментальные результаты. Модельная композиция изготавливается из трех рядов коротких алюминиевых стержней, которые охвачены полиэфирной смолой. Экспериментально определяется модуль упругости образца и напряжения в отдельных точках армирующих стержней. Для сопоставления этих экспериментальных результатов с расчетом, решались уравнения для модели однонаправленно армированного элементарного слоя с такими же параметрами и размерами армирующих элементов как у модельной композиции. Рассчитанный модуль упругости превышает экспериментальный на 10%.

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что предложенная расчетная модель применима для прогнозирования свойств

композиции, армированной однонаправленными короткими волокнами.

Анализ элементарного слоя с однонаправленным армированием позволяет определить величины концентрации напряжений у концов армирующих элементов, что является причиной начала образования трещин и разрушения материала.

В третьей главе исследован процесс образования трещин в полимерной матрице и механизм постепенного разрушения однонаправленно армированной композиции. Полагается, что разрушение произойдет там, где напряжения первыми достигнут своих предельных значений при увеличении общей нагрузки. По полученным эпюрам напряжений установлено, что сначала разрушается полимерная матрица в местах концентрации нормальных напряжений - вблизи концов коротких волокон, задолго до разрушения всей композиции в целом. В местах концентрации напряжений в слоях полимерной матрицы появляются трещины. В процессе постепенного образования трещин около концентраторов напряжений происходит перераспределение напряжений и затем устанавливается равновесное состояние. При увеличении внешней нагрузки максимальные напряжения в армирующих волокнах или в полимерной матрице достигают предельных величин и происходит разрушение композиции.

Эпюры напряжений и их максимальные значения сильно зависят от случайного расположения концов коротких армирующих элементов - α_1 , α_2 и, таким образом, максимальные значения напряжений также являются случайными величинами.

При помощи модели однонаправленно армированного элементарного слоя исследовано влияние случайного расположения армирующих элементов на максимальные значения напряжений в компонентах композиции и определены их законы распределения.

Для того, чтобы определить законы распределения максимальных значений напряжений, общая длина расчетной модели делилась на 10 равных участков, где могут находиться концы волокон и задача решалась при всех возможных комбинациях расположения концов коротких волокон. При проверке на нормальный, логарифмически нормальный, гамма и Вейбулла законы распределения оказалось, что для однонаправленно армированного слоя без трещин максимальные величины напряжений с большей вероятностью соответствуют логарифмически нормальному закону распределения, а для слоя с тре-

щинами - логарифмически нормальному распределению и распределению Вейбулла. Определенный предел прочности на 30% выше предела прочности стеклопластика, полученного из эксперимента. После появления трещин в слоях полимерной матрицы модуль упругости композиции уменьшается на 20-25%.

В четвертой главе рассматривается влияние температуры на распределение напряжений в однонаправленно армированном элементарном слое и установлен предел длительной прочности. Определяются эпюры внутренних напряжений при нагревании сразу после изменения температуры в однонаправленно армированном элементарном слое. Сделана попытка определить коэффициент линейного расширения композиции, армированной короткими, параллельно расположенными, волокнами при известных коэффициентах отдельных компонентов. Оказалось, что коэффициент линейного расширения композиции, армированной прерывными волокнами сильно зависит от длины волокон. С увеличением длины армирующих волокон коэффициент линейного расширения стремится к величине коэффициента линейного расширения непрерывно армированной композиции, а с уменьшением длины приближается к величине коэффициента линейного расширения полимерной матрицы. Сравниваются коэффициенты линейного расширения: определенный экспериментально и при помощи расчетной модели для композиции с длиной армирующих волокон 10 мм. Обнаруживается хорошее совпадение. Предложена методика теоретического определения коэффициента линейного расширения хаотически армированного материала. При этом отличие расчетной величины от экспериментальной составляет 5%.

Разработана методика учета влияния времени на деформативные свойства однонаправленно армированного материала. Влияние времени учитывается через изменение модуля упругости полимерного связующего. Для определения закона деформирования полимерного связующего как упруго-вязкого материала применена реологическая модель так называемого "типичного тела". Используя результаты, полученные при анализе однонаправленно армированного элементарного слоя, определена временная зависимость прочности. Экспериментальные данные имеют значительный разброс как по времени так и по напряжениям, но расчетная кривая длительной прочности проходит через пределы 90%-ых доверительных интервалов и не противоречит опытам.

Предел длительной прочности однонаправленно армированной композиции составляет около 78% от кратковременной прочности.

Пятая глава посвящена определению деформативных и прочностных свойств хаотически армированного стеклопластика. Многие факторы (трудно поддающиеся математическому описанию взаимодействия хаотически расположенных армирующих элементов, особенности технологии изготовления, большой разброс экспериментальных результатов) показывают на нецелесообразность сложных теоретических выкладок. Предлагается оценить прочностные и деформативные свойства хаотически армированного материала по известным свойствам однонаправленного материала и его отдельных компонентов.

Для однонаправленно армированного слоя определены прочностные и деформативные свойства, учитывая концентрацию напряжений, взаимное влияние и случайное расположение армирующих элементов при увеличении их числа в продольном и поперечном направлении, если направление армирования совпадает с направлением приложенной нагрузки. В хаотически армированном материале большая часть нагрузки воспринимается именно этими слоями.

Принимаем, что хаотически наполненный материал составлен из плоских однонаправленно армированных слоев, а в отдельных слоях волокна могут быть расположены с одинаковой вероятностью под различными углами к направлению внешней растягивающей силы. Все слои деформируются одинаково и разрушение начинается в том слое, в котором предельная деформация наименьшая. Предполагается, что материал в целом разрушится тогда, когда начнет разрушаться слой с меньшей предельной деформацией. Определяются и сравниваются деформации разрушения слоев с разной ориентацией волокон. Наименьшая деформация разрушения оказалась у слоев с перпендикулярным направлением армирования относительно внешней нагрузки. Прочность хаотически армированного материала определяется из величины общей нагрузки, которую воспринимает материал в момент, когда общая деформация равна предельной деформации слоя с перпендикулярно расположенной арматурой.

Рассмотрена возможность определения предела прочности хаотически армированного стеклопластика в случае частной ориентации армирующих элементов.

Определен модуль упругости элементарного слоя, армированного однонаправленными короткими волокнами в зависимости от угла ориентации слоя и результат использован для установления модуля упру-

гости хаотически армированного материала путем усреднения по слоям с различной ориентацией.

Экспериментальная проверка прочностных и деформативных характеристик хаотически наполненного материала подтверждает целесообразность применения разработанной модели для прогнозирования механических свойств при растяжении стеклопластика, армированного короткими, хаотически расположенными волокнами в параллельных плоскостях.

ВЫВОДЫ

1. Предложена модель хаотически армированного стеклопластика, позволяющая учитывать влияние ориентации коротких армирующих волокон на механические свойства материала при растяжении. Анализ модели дает возможность установить такие размеры армирующих элементов и такую жесткость сцепления на сдвиг между матрицей и арматурой, при которых будет достигнута оптимальная прочность композиционного материала (под оптимальной подразумевается такая прочность, при достижении которой разрушение армирующих стекловолокон, полимерной матрицы и их взаимного сцепления на сдвиг происходит одновременно и таким образом максимально использована прочность всех составляющих компонентов композитного материала).

2. Найденные расчетным путем распределения напряжений в компонентах композиционного материала удовлетворительно совпадают с установленными экспериментально в модельных композициях.

3. Решение уравнений, полученных при помощи расчетных моделей однонаправленно армированного элементарного слоя на ЭВМ, позволило определить распределение нормальных и касательных напряжений в стекловолокнах и в полимерной матрице. Установлена картина и определены величины концентрации напряжений около концов коротких армирующих элементов, что является главной причиной начала разрушения материала. Изучен постепенный процесс роста напряжений и повреждений в отдельных компонентах и установлена возможная

схема разрушения композиции при увеличении внешней растягивающей нагрузки.

4. Изучено влияние случайного взаимного расположения коротких армирующих волокон на величины максимальных напряжений. Установлены законы распределения случайных величин - максимальных значений нормальных и касательных напряжений в стекловолокнах и в полимерной матрице, что дает возможность прогнозировать основные механические характеристики стеклопластика по известным механическим и геометрическим характеристикам отдельных компонентов.

5. Определено распределение напряжений в компонентах композиции, возникающих от изменения температуры и разработаны методы определения коэффициента линейного расширения для однонаправленного и хаотически армированных композиционных материалов.

6. Предложены и экспериментально подтверждены критерий кратковременной прочности и выражение для модуля упругости хаотически армированного стеклопластика с учетом свойств компонентов и случайного взаимного расположения коротких армирующих элементов.

Материалы диссертации опубликованы в следующих статьях:

1. Ю.А.Калинка, С.М.Боровикова.
Исследование физико-механических свойств хаотически наполненных стеклополиимидов, - "Механика полимеров", 1971, № 3.
2. Э.Э.Лавендел, Ю.А.Калинка.
Взаимодействие полимерной матрицы с армирующими короткими волокнами, - "Механика полимеров", 1971, № 6.
3. Э.Э.Лавендел, Ю.А.Калинка.
Распределение напряжений в модели стеклопластика армированного короткими волокнами. - В сб.: Вопросы динамики и прочности, вып. 26, Рига, "Зинатне", 1973. (в печати).
4. Ю.А.Калинка, Э.Э.Лавендел.
Температурные напряжения и коэффициент линейного расширения композиции, армированной волокнами конечной длины. - В сб.: Вопросы динамики и прочности, вып. 28, Рига, "Зинатне", 1973. (в печати).
5. Ю.А.Калинка
Длительная прочность однонаправленного стеклопластика на основе коротких волокон. - В сб.: Вопросы динамики и прочности, вып. 29, Рига, "Зинатне", 1973. (в печати).

Методика экспериментов, обработка результатов испытаний
представлены в отчетах:

1. Исследование механических свойств стеклонаполненных полиамидов. № 674-68, РПИ, 1968.
2. Исследование неоднородности прочностных свойств хаотически наполненных стекловолокнистых композиционных материалов. № 805-68, РПИ, 1969.
3. Определение вязкоупругих характеристик стекловолокнистых композиционных прессматериалов. № 989-69, РПИ, 1970.
4. Определение оптимальных размеров армирующих элементов высокотекучих композиционных прессматериалов. № 1201-70, РПИ, 1971.
5. Исследование механических характеристик композиционных материалов, отличающихся структурными параметрами в изделиях. № 1435-71, РПИ, 1973.

Материалы диссертации докладывались на научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава и научных работников Рижского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института, сентябрь-октябрь 1972 года; на семинарах по теории упругости при кафедре сопротивления материалов РПИ и на семинарах в Институте механики полимеров, г.Рига.

Редактор Г.Шаталова, технический редактор И.Брамберг

Подписано к печати 10 мая 1973 года. Формат 60x84/16.

1,0 печ. л., 0,93 усл.гзч.л., 0,82 уч.-изд.л. Тираж 120 экз.
ЯТ 06208. Бесплатно. Отпечатано в типографии РПИ, г.Рига,
ул. Ленина, 1. Заказ № 488.