

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
ВВЕДЕНИЕ.....	8
Глава 1. РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ СОЗДАНИЯ МОНОЛИТНЫХ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЕМКОСТЕЙ ИЗ АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИКОВ.....	10
1.1. Влияние условий изготовления и испытаний намоточных образцов на свойства композитов.....	10
1.2. Влияние исходной прочности волокон и ее дисперсии на прочность армированных пластиков	12
1.3. Влияние свойств связующего на прочность армированных пластиков	15
1.4. Влияние объемного содержания волокон на прочность армированных пластиков	17
1.5. Влияние диаметра волокон на прочность армированных пластиков	17
1.6. Влияние ориентации волокон на прочность армированных пластиков	19
1.7. Влияние пористости на прочность армированных пластиков	19
1.8. Адгезионное взаимодействие компонентов и его корреляция с прочностью композитов при сжатии и сдвиге	20
Глава 2. РОЛЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПРОЧНОСТИ ОБОЛОЧЕК ИЗ АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИКОВ И СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ	22
2.1. Остаточные напряжения после отверждения толстостенных изделий из волокнистых армированных пластиков	22
2.2. Расчет остаточных напряжений на различных этапах получения заготовок из армированных пластиков методом намотки.....	25
2.2.1. Этап намотки нити на оправку	27
2.2.2. Этап разогрева полуфабриката. Фильтрация связующего при намотке и разогреве	33
2.2.3. Этап полимеризации полуфабриката. Фронтальное отверждение	38
2.2.4. Охлаждение композитной оболочки на оправке	41
2.2.5. Экспериментальные исследования остаточных макронапряжений в намоточных композитах.....	43
2.3. Технологическая монолитность толстостенных оболочек из армированных непрерывными волокнами полимеров	46
2.4. Критерий гарантированной монолитности намоточного цилиндра.....	49
2.5. Взаимодействие композитной оболочки и изотропной оправки. Послойное отверждение.....	54
2.6. Оптимизация процесса термообработки с целью обеспечения монолитности толстостенного намоточного цилиндра.....	56
2.7. Оптимизация охлаждения толстостенных оболочек.....	60
2.7.1. Методика решения задачи оптимизации охлаждения толстостенных композитных оболочек	60
2.7.2. Результаты расчетов задачи оптимизации охлаждения толстостенных композитных оболочек	66
2.7.3. Классификация оптимальных режимов.....	69
2.8. Остаточные напряжения в процессе хранения и эксплуатации оболочек из армированных пластиков	71

2.8.1. Остаточные напряжения в процессе хранения и эксплуатации.....	73
2.8.2. Циклическое изменение температуры	75
2.8.3. Изотермический процесс релаксации температурных напряжений в полимерных стержнях	76
2.8.3.1. Релаксация напряжений после прямого нагрева или охлаждения. Методика определения констант.....	77
2.8.3.2. Релаксация напряжений, полученных при циклическом изменении температуры заземленного стержня.....	80
2.8.4. Решение задач о температурных напряжениях в полимерных стержнях и сопоставление с экспериментом	83
2.8.4.1. Однородное изменение температуры	84
2.8.4.2. Неоднородное нагревание полимерных стержней	88
2.8.5. Изотермическая релаксация температурных напряжений в стержнях.....	88
2.8.6. Температурные напряжения и релаксационные явления в бесконечном ортотропном цилиндре из армированного пластика.....	89
Глава 3. СОСУДЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВ	92
3.1. Расчет силовой оболочки с днищами сосуда высокого давления при действии внутреннего давления.....	93
3.2. Разработка методики для определения прочности силовых оболочек для сосудов высокого давления.....	95
3.2.1. Определение прочности силовой оболочки с применением метода испытаний образцов растяжением в полудисках.....	96
3.2.2. Испытание колец в 72-кулачковом приспособлении.....	106
3.2.3. Результаты измерения модуля упругости однонаправленных намоточных колец из стеклопластика акустическим методом.....	108
3.3. Полимер-композитные емкости.....	110
3.4. Безлейнерные композитные емкости для хранения газов	111
3.4.1. Исследования герметичности образцов	112
3.4.2. Определение физико-механических свойств образцов.....	116
3.4.3. Испытания образцов в полудисках.....	117
3.4.4. Испытания в 72-кулачковом приспособлении	118
Глава 4. ПОСТРОЕНИЕ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ НАМОТКИ ОБЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ.....	121
4.1. Цилиндрическая оболочка	122
4.1.1. Определение траектории витка для оболочки	122
4.1.2. Определение координат раскладочной головки для цилиндрической оболочки	124
4.2. Оболочка с конической поверхностью	128
4.3. Оболочка типа «кокон» со сферическими днищами	129
4.3.1. Определение траектории витка для оболочки	129
4.3.2. Расчет координат центра раскладочной головки намоточного станка оболочки типа «кокон»	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	138
Библиографический список	139

ПРЕДИСЛОВИЕ

В 2022 г. исполнилось 75 лет Лаборатории армированных пластиков отдела полимеров и композитов Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семенова РАН. Армированными пластиками являются полимерные композиционные материалы, состоящие из ориентированных непрерывных волокон, соединенных полимерной матрицей. Идея создания таких материалов заключалась в том, чтобы использовать высокие упруго-прочностные свойства волокон в конструкционных материалах в направлении главных действующих нагрузок. Примеры подобных конструкций можно найти в природе — стволы деревьев и кости животных, представляющие собой анизотропные материалы, свойства которых соответствуют направлениям напряжений, возникающих от приложения внешних нагрузок.

Разработка и всесторонние исследования армированных полимеров в XX в. были обусловлены получением непрерывных волокон с упруго-прочностными характеристиками в десятки раз выше, чем у природных материалов. Сначала это были тканые наполнители на основе стеклянных волокон, использующиеся для получения стеклотекстолитов.

В нашей стране, по-видимому, впервые были сформулированы принципы создания нетканых ориентированных материалов в 40-х гг. прошлого столетия выдающимся архитектором и ученым Андреем Константиновичем Буровым. Для проведения систематических исследований армированных пластиков в 1947 г. А.К. Буровым была создана Лаборатория анизотропных структур (позднее — Лаборатория армированных пластиков), которая располагалась в здании церкви у Петровских ворот и входила в состав Академии наук.

Для создания группы физико-механических испытаний и исследований А.К. Буров пригласил Александра Лазаревича Рабиновича, выведшего эту группу на высокий международный уровень. В результате этих исследований А.Л. Рабиновичем была написана монография по механике армированных полимеров [1]. Позднее вышла еще одна классическая работа Григория Ильича Гуревича [2]. Это тот единственный в мире исследовательский труд, в котором на основе рассмотрения молекулярного механизма упругих и неупругих деформаций конденсированных сред, включая полимеры, выведено дифференциальное уравнение связи между напряжениями, деформациями и временем. Уравнение весьма удобно в том числе для решения задач численными методами.

К большому сожалению, Андрей Константинович Буров скоропостижно скончался в 1957 г. в самом расцвете сил и намерений. После преждевременной кончины А.К. Бурова лауреат Нобелевской премии академик Н.Н. Семенов включил лабораторию в состав создававшегося в это время отдела полимеров Института химической физики РАН (ныне — ФИЦ ХФ РАН).

После А.К. Бурова лабораторией заведовала Галя Дмитриевна Андреевская, в 1984 г. Лабораторию армированных пластиков возглавил Эдуард Семенович Зеленский.

75 лет назад наука о синтетических анизотропных материалах находилась в зачаточном состоянии. Быстрое развитие этой отрасли было вызвано необходимостью создания легких и прочных материалов для летательных аппаратов, ракет-носителей, спутников и т.д. Появление углеродных и арамидных волокон, свойства которых, в особенности удельные, оказались значительно выше свойств стеклянных волокон, вывело науку о композиционных материалах на новый уровень развития.

В лаборатории был создан по новой технологии, исключаяющей текстильную переработку волокна, уникальный по прочностным, упругим и диэлектрическим свойствам полимерный композит СВМ — стекловолокнистый анизотропный материал. А.К. Буров и Г.Д. Андреевская предложили периодический метод получения СВМа непосредственно в процессе вытягивания волокон из стеклоплавильного сосуда. В рамках предложен-

ного метода изготавливались так называемые перекрестные стеклошпоны, которые собирали в пакет и прессовали. Позднее Э.С. Зеленский предложил непрерывный метод получения однонаправленного стеклошпона в виде полотна, ленты или дозированного стекловолокнита — ДСВ. А.К. Буров предполагал также возможность изготовления в этом процессе не полуфабриката (стеклошпона), а сразу элемента готового изделия.

Лаборатория армированных пластиков опубликовала более 10 монографий, сотни статей в отечественных и зарубежных журналах, более 100 авторских свидетельств и патентов. Работы лаборатории отмечены двумя премиями Совета Министров СССР. Три сотрудника получили премию персонально: д-р техн. наук Э.С. Зеленский, д-р техн. наук А.М. Куперман, д-р физ.-мат. наук, проф. Р.А. Турусов.

Все эти годы лаборатория активно сотрудничала с академическими, учебными и отраслевыми организациями, в частности с ИНЭОС РАН, ИМЕТ РАН, ФИЦ ХФ РАН, Институтом механики полимеров (Рига, Латвия), АО «ЦНИИСМ» (г. Хотьково, г. Сергиев Посад), ВИАМ, ВНИИСПВ (Крюково, Зеленоград), НПО «Технология» (г. Обнинск), РХТУ им. Д.И. Менделеева, МИТХТ им. М.В. Ломоносова, АО «Композит» (г. Королев), НИАТ (Москва), НИУ МГСУ и др.

Предлагаемая рукопись содержит ряд уникальных экспериментальных и теоретических результатов, полученных при активном участии сотрудников Лаборатории армированных пластиков ФИЦ ХФ РАН в разное время, в частности А.М. Купермана, А.Я. Горенберга и др.

Авторы приносят дань глубокого уважения памяти безвременно скончавшегося А.М. Купермана, заведующего Лабораторией армированных пластиков ФИЦ ХФ РАН, талантливого ученого и наставника.

ВВЕДЕНИЕ

Для успешного освоения ближнего и дальнего космоса, стратосферы, больших океанских и материковых глубин, повышения технических характеристик образцов техники гражданского и военного назначения необходимы герметичные емкости и контейнеры с высоким коэффициентом весового (массового) совершенства, который измеряется в километрах и представляет собой произведение наружного или внутреннего давления на внутренний объем емкости, деленное на вес (массу) емкости: $\mu_V = PV/(Mg)$. Преимущество по этим показателям за полимерами, армированными непрерывными высокомодульными и высокопрочными волокнами, из которых формируется оболочка требуемой формы и толщины. При изготовлении таких оболочек в настоящее время используется метод намотки непрерывных армирующих волокон, пропитанных связующим, на формообразующую оправку либо герметизирующий лейнер. При всем многообразии форм оболочек, реализуемых методом намотки в зависимости от требований назначения изделия, при проектировании герметичных емкостей и контейнеров, как правило, стремятся к реализации простых геометрических форм — цилиндр, конус, эллипс, сфера, «чечевица». Это обусловлено, прежде всего, повышенной несущей способностью при действии внутреннего или внешнего давления по сравнению, например, с оболочкой квадратного поперечного сечения.

Приведем в качестве примера сравнение некоторых показателей для баллона длиной 4 м, диаметром 1 м, с внутренним объемом $2,5 \text{ м}^3$ для хранения различных газов под давлением 15 МПа. Материалы работают в пределах упругости с коэффициентом запаса 2,6. Баллон из водородоустойчивой стали ВНС 17 имеет: сухой вес — около 5 т, толщину стенки — 50 мм, коэффициент весового совершенства — порядка 2 км, коэффициент удельной материалоемкости M/V — примерно 2 т/м^3 . Баллон из углепластика с лейнером из этой же стали имеет: сухой вес — порядка 2 т, толщину стенки лейнера — 12 мм, толщину углепластика — примерно 25 мм, коэффициент весового совершенства — 5 км, коэффициент удельной материалоемкости — порядка $0,8 \text{ т/м}^3$. Если изготовить этот баллон целиком из углепластика, то коэффициент весового совершенства может достичь 15–18 км. Случайный взрыв такого баллона из металла образует разлетающиеся с огромной скоростью смертельно опасные металлические осколки. Баллон из армированного полимера разрушается локализованной и значительно менее опасной размоткой. Некоторые данные о содержащихся в таком баллоне газов приведены в нижеследующей таблице.

Газ	Энергия газа в кг тротила	Масса газа, кг	Температура выпуска, °С
Азот	33	1250	–225
Кислород	36	1429	–225
Водород	41	90	–221

Обращает на себя внимание энергия сжатых в баллоне газов в тротиловом эквиваленте. Время аварийного выпуска газа ~ 10 мин. Расчетная скорость выпуска водорода ~ 3000 м/с.

Сосуды высокого давления из полимерных композиционных материалов имеют перспективы в различных областях:

– в системах хранения компонентов топлива и окислителя конструкций ракет-носителей и космических аппаратов. Выигрыш по массе топливного бака, изготовленного полностью из композиционных материалов, может составить не менее 25 % по сравнению с металлическими топливными баками;

– в автомобилестроении. Активно развивающимся направлением на сегодняшний день является разработка двигателей внутреннего сгорания, работающих на газообразном

топливе — метане, пропане и водороде, что позволяет снизить количество загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу по сравнению с дизельным и бензиновым топливом;

- в конструкциях летательных аппаратов; в качестве газовых аккумуляторов, топливных баков, баков наддува;
- в дыхательных аппаратах, переносимых на спине человека (для служб МЧС, подводного плавания и т.п.);
- в пищевой промышленности и в быту;
- в производстве энергоустановок на базе твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), работающих на водороде;
- в конструкциях корпусов глубоководных аппаратов.

Таким образом, создание высокопрочных и герметичных по различным газам оболочек с высоким весовым совершенством, состоящих только из композиционных материалов, является важнейшей научно-технической задачей на сегодняшний день, решение которой позволит повысить массовую эффективность высоконагруженных изделий.

Однако воплощению указанных выше характеристик намоточных волокнистых полимерных композитов в емкостях препятствуют два их фундаментальных свойства: анизотропия в условиях двухсвязности геометрической формы намоточных изделий (емкостей) и низкая, по сравнению с металлами, герметичность намоточного композита. Использование металлического лайнера позволяет решить проблему герметичности, но это приводит к большим потерям в весовом совершенстве емкостей.

К чему приводит анизотропия физико-механических свойств намоточного композита? Для намоточного цилиндра разность усадок и коэффициентов линейного температурного расширения в окружном и радиальном направлениях у тонкостенного узкого кольца после отверждения, охлаждения и снятия с цилиндрической оправки может произойти потеря устойчивости, т.е. меняется форма — кольцо превращается в восьмерку. Это является результатом того, что радиус и окружность уже не связаны простым соотношением $L = 2\pi R$. Для толстостенного намоточного цилиндра потеря устойчивости формы невозможна, поэтому в результате отверждения в цилиндре возникают большие растягивающие радиальные напряжения, часто приводящие к образованию кольцевых трещин, способных разделить цилиндр на более тонкие цилиндры.

Низкая, по сравнению с металлами, герметичность намоточных композитов является отчасти прямым следствием указанной анизотропии, но главная причина заключается в адгезии, т.е. прилипании полимерного связующего к волокну. Без смачивания волокна полимером (часто эпоксидным) нет адгезии, так как адгезионные связи формируются на стадии смачивания, а без адгезии нельзя создать монолитный композит. Полимер, будем часто называть его адгезивом, собирающим волокна в монолитный композит, прилипнув к волокну, претерпевает при отверждении и охлаждении теперь уже стесненную усадку. Но не может ее реализовать в силу высокой жесткости волокон и малого, по сравнению с полимером, коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР) и анизотропии. В результате полимер оказывается всесторонне растянутым и, как следствие, рыхлым по сравнению с блочным полимером, отверждаемым в свободном состоянии.

Обе указанных причины являются фундаментальными, так как без этих явлений нельзя создать волокнистый полимерный композит.

Предлагаемая монография посвящена способам и технологиям создания толстостенных намоточных волокнистых герметичных оболочек с высоким весовым (массовым) совершенством.

Глава 1. РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ СОЗДАНИЯ МОНОЛИТНЫХ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЕМКостей ИЗ АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИКОВ

1.1. Влияние условий изготовления и испытаний намоточных образцов на свойства композитов

Наиболее распространенным методом получения оболочек из армированных пластиков является метод намотки. Намотка волокон, пропитанных связующим, позволяет осуществить строгую ориентацию волокон в соответствии с главным направлением действующих нагрузок, обеспечить высокую степень наполнения и благодаря этому реализовать в композитах высокую прочность и жесткость волокон.

При разработке технологии намотки композитных оболочек важно решить следующие основные задачи:

- обеспечить сохранение исходной прочности армирующих волокон;
- равномерно пропитать используемые нити или жгуты полимерным связующим;
- при формировании структуры материала обеспечить необходимую ориентацию волокон и достичь высокого содержания волокон, что обуславливает соответственное повышение упруго-прочностных свойств композитов.

Все типы применяемых в настоящее время армирующих волокон из-за высокой жесткости и хрупкости легко повреждаются и разрушаются, в особенности это касается углеродных и стеклянных волокон повышенного диаметра. Например, прочность элементарных стеклянных волокон, извлеченных из нити, в 1,5–3,0 раза ниже исходной прочности волокон в момент вытягивания их из фильер стеклоплавильного сосуда. Идеальным методом с точки зрения сохранения прочности стеклянных волокон является намотка стеклопластиков из элементарных волокон. Этот метод был широко опробован сотрудниками Лаборатории армированных пластиков в [3–7], технологическая схема показана на рис. 1.1. Прочность образцов оказалась на 20–30 % выше, нежели аналогичных материалов, изготовленных из промышленных нитей.

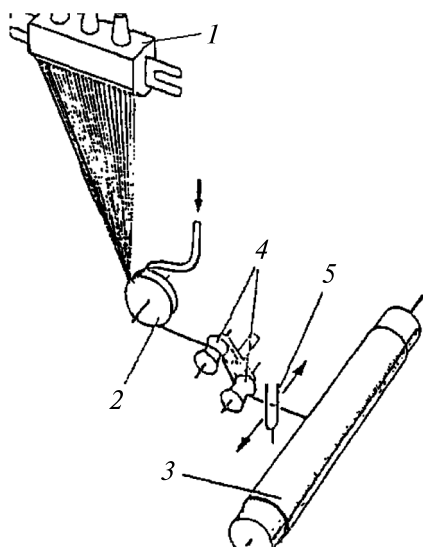


Рис. 1.1. Схема метода намотки стеклопластиков из элементарных стеклянных волокон:

- 1 — стеклоплавильный сосуд;
2 — ролик-аппликатор; 3 — оправка;
4 — натяжные ролики; 5 — раскладчик

Другими преимуществами метода намотки из «элементарных» волокон являются возможность использования стеклянных волокон практически любого диаметра, отсутствие замасливателей (соответственно, повышенная водостойкость, прозрачность материалов) и высокая производительность процесса. Экспериментальные исследования по воздействию на стеклянные жгуты, состоящие из волокон диаметром 20 мкм, таких «опасных» элементов пропиточно-натяжных устройств, как «гребенка» и «ножи» пропиточной ванны, показали, что снижение прочности жгутов, микропластиков и кольцевых образцов, связанное с повреждением волокон на этих узлах намоточного станка, составляет 10–25 % как при растяжении, так и при сжатии образцов. В [8] разработан метод определения дефектности жгутов (разнодлинность волокон, количество порванных волокон, степень их склеенности), основанный на анализе диаграмм растяжения жгутов и микропластиков из них.

Изучение вопросов пропитки волокнистых материалов связующим показало, что эффективным

фактором повышения ее качества, помимо снижения вязкости связующего, является создание градиентов давлений, обеспечивающих проникновение (продавливание) связующего в межволоконное пространство. Желательно этот процесс повторять многократно, облегчая условия удаления пузырьков воздуха.

В композиционных материалах основную нагрузку воспринимает прочное волокно, а связующее передает и перераспределяет нагрузку между волокнами. Поэтому при создании композиционных материалов стараются получить повышенное содержание доли волокон в композите. Обычно содержание волокон в нетканых армированных пластиках в зависимости от вязкости связующего, диаметра волокон и их предварительного натяжения не превышает 50–70 %. Теоретически при плотнейшей гексагональной упаковке волокон оно могло бы достигать 90,7 %. Технологические трудности, не позволяющие получить более высокое содержание волокон, обусловлены главным образом трением, возникающим между волокнами в процессе формования материала на оправке, которое препятствует их перераспределению в более оптимальную гексагональную структуру [9; 10].

Пути преодоления этих трудностей представляются, прежде всего, в упорядочении структуры наматываемого элемента, т.е. в обеспечении ориентации и плотной упаковки волокон на том этапе, когда их взаиморасположение еще не зафиксировано силами нормального давления, возникающими под действием предварительного натяжения армирующих волокон на оправке. Для достижения этой цели использовались некрученые нити малой линейной плотности, которые пропускали через систему вращающихся натяжных роликов и формировали из них упорядоченную тонкую ленточку на специальном профилированном укладчике, расположенном вблизи поверхности оправок.

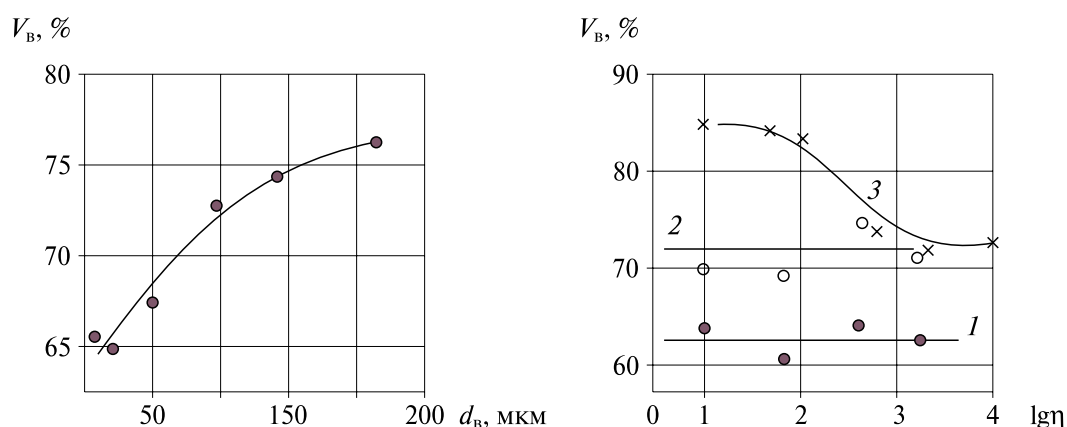


Рис. 1.2. Относительное содержание волокон V_B в кольцевых образцах стеклопластиков в зависимости от диаметра волокон d_B и вязкости связующего η .

Намотка производилась толстым жгутом 1 (●), тонким жгутом 2 (○) и уплотненной ленточкой 3 (×)

На рис. 1.2 приводятся экспериментальные данные, характеризующие влияние вязкости связующего и диаметра элементарных волокон на объемное содержание волокон в стеклопластиках, полученных намоткой жгутом и упорядоченной ленточкой. Видно, что содержание волокон отличается на 8–12 %; характер зависимостей также различен: изменение технологических параметров фактически не влияет на объемное содержание волокон в материалах, намотанных лентой. Применение особых технологических приемов: ультразвуковые колебания, сочетания волокон различного диаметра, разогрев связующего в зоне формирования материала горячим воздухом — позволили повысить содержание волокон до 84 % и тем самым приблизиться к теоретически возможным значениям. При использовании аморфных органических волокон существует возможность получения высокоармированных органоволокнитов с содержанием волокон до 90–95 % по объему. Это достигается в процессе намотки за счет необратимого термдеформирования волокон в на-

правлении, перпендикулярном их оси, приводящего к изменению их сечения от круглого к сечению произвольной формы, обусловленной контактом с соседними волокнами [11].

На основе представленных выше исследований, проведенных в Лаборатории армированных пластиков, был разработан пропиточно-натяжной тракт, схематически показанный на рис. 1.3. Жгут со шпулярика 1 через направляющее кольцо 2 попадает в канавку ролика 3, вращающегося в ванне со связующим 4. Количество наносимого полимера регулируется скоростью его вращения и глубиной погружения жгута в канавку ролика. Затем жгут делает 10–12 витков по двум вращающимся барабанам 5, расположенным наклонно по отношению друг к другу (один из барабанов имеет подтормаживающее устройство 6, обеспечивающее натяжение жгута на оправку), и далее попадает на профилированный раскладчик. Намотка жгута производится на оправку 7.

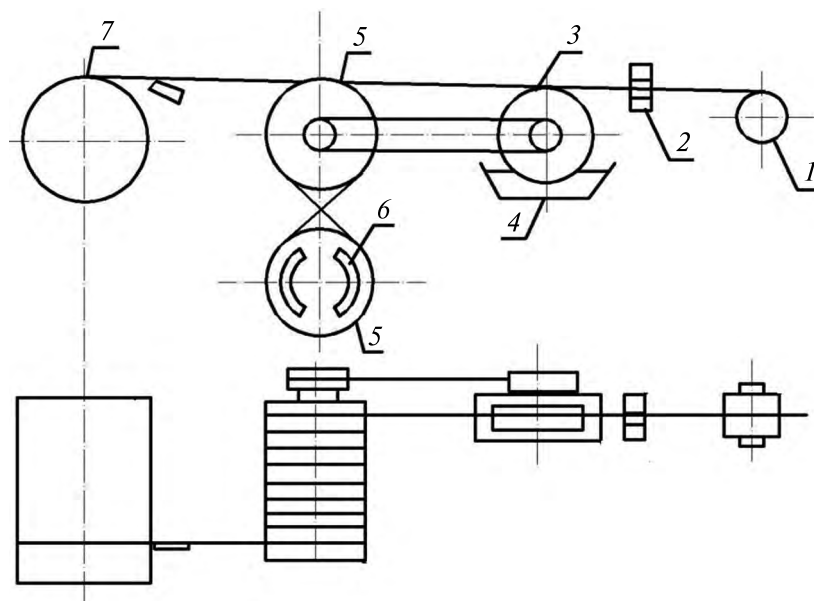


Рис. 1.3. Технологическая схема намотки изделия из армированных пластиков

1.2. Влияние исходной прочности волокон и ее дисперсии на прочность армированных пластиков

Высокие упруго-прочностные характеристики стеклянных, углеродных или органических волокон, на два порядка превышающие свойства объемных образцов, несомненно, являются главным стимулом создания армированных пластиков. Исследования, направленные на их дальнейшее повышение путем усовершенствования составов и условий формирования, прошли красной нитью через всю историю создания композитов и привели к появлению таких волокон, как, например, Армос или Торей-800 с прочностью при растяжении более 5 ГПа.

Исследование свойств армирующих волокон проводилось в ЛАП на всех этапах примерно 40-летней истории развития композитов. При изучении свойств элементарных волокон исходили из необходимости выявить их действительную прочность, избежать повреждения при извлечении из нитей. Так был разработан метод получения неповрежденных образцов стеклянных волокон в процессе их вытягивания [4–7]. Это дало возможность изучить влияние условий гомогенизации стекломассы в плавильном сосуде на прочность волокон. Было показано, что прочность «неповрежденных» волокон мало зависит от их диаметра вплоть до 50–100 мкм. К сожалению, такого рода исследования не представляется возможным провести на органических и углеродных волокнах, так как становление их прочности и жесткости связано не только с формованием, но и с последующими процессами термообработки нити.

Механические характеристики армированных пластиков в значительной мере определяются дисперсией прочности и разрывного удлинения волокон. Согласно статистической модели разрушения Б. Розена прочность однонаправленного пластика при растяжении совпадает с прочностью пучка армированных волокон на так называемой «неэффективной» длине. В свою очередь, снижение прочности пучка волокон по сравнению с их средней прочностью определяется дисперсией прочности элементарных волокон.

При изучении прочности элементарных волокон в каждом опыте были испытаны не менее 50–100 образцов, что позволило получить статистически достоверные результаты, определить параметры кривой распределения прочности и сопоставить их с коэффициентом Вейбулла из зависимости прочности волокон от длины образцов [12].

Еще в 60-х гг. в ЛАП использовали прочность пропитанной связующим и заполимеризованной нити, так называемого микропластика, в качестве исходного критерия реализации прочности волокон. Точка пересечения масштабной зависимости прочности микропластиков и исходной нити позволила установить «неэффективную» длину. Эти данные сопоставлялись с измерением адгезионной прочности системы. Разработан оригинальный подход к расчету коэффициента реализации прочности волокон, основанный на сопоставлении измеренной прочности композита с гипотетической прочностью, рассчитанной или наблюдающейся при «идеализированном» механизме его разрушения.

На основе анализа диаграмм растяжения σ от ϵ были разработаны методы определения дисперсии длины волокон в нити и нитей в жгуте (разнодлинности), а также критерии, характеризующие степень связанности (склеенности) волокон в нити [8]. На реальных и модельных образцах жгутов из 17 полиарамидных нитей была изучена дисперсия прочности модуля упругости и коэффициента Вейбулла для составляющих нитей и микропластиков из них, установлена дисперсия величины «неэффективной» длины. Было показано, что с увеличением числа составляющих нитей прочность жгута, микропластиков и кольцевых образцов из них снижается на 10–20 %. Для иллюстрации этих результатов на рис. 1.4 приведены расчетные диаграммы растяжения $\sigma - \epsilon$ жгутов, в которых дисперсия длины волокон ν варьируется от 0 до 1 % [13–15].

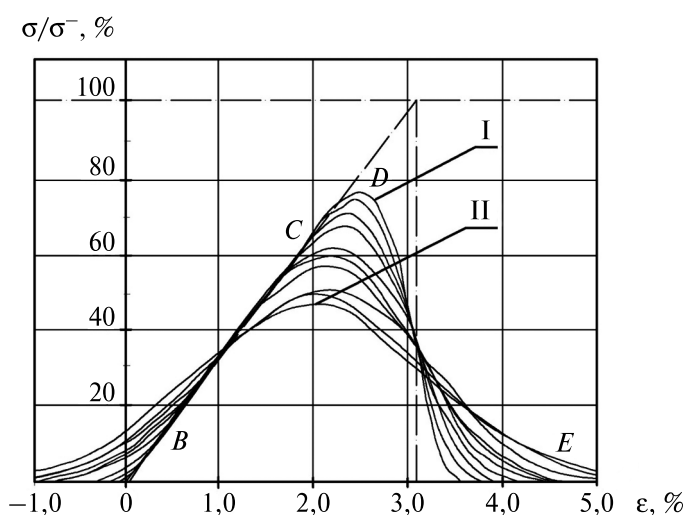


Рис. 1.4. Кривые деформирования нитей на основе органических волокон. Диаграммы $\sigma/\sigma^- - \epsilon$ — при растяжении нити из 300 волокон с различным коэффициентом вариации их длины νL ; кривые I, II соответствуют $\nu L = 0 \dots 1,0$ % с шагом 0,1 %

Аналогичные исследования были проведены на жгутах, состоящих из различного количества N стеклянных нитей. При испытании образцов на растяжение результаты оказались идентичными, при сжатии же кольцевых образцов снижение прочности с увеличением N было незначительным и связано, по-видимому, с изменением содержания волокон.

Более четко влияние сочетания волокон с различной деформативностью на прочность армированного пластика было показано на гибридных композитах, сочетающих, в частности, стеклянные и углеродные волокна в различных соотношениях [16]. На рис. 1.5 приводятся диаграммы σ от ϵ растяжения и сжатия в зависимости от содержания волокон с разными модулями упругости, а на рис. 1.6 — относительные величины модуля упругости, прочности при растяжении и изгибе, прочности при сжатии и сдвиге, плотности стеклоуглепластиков в зависимости от соотношения содержания стеклянных и углеродных волокон, имеющих различные модули прочности. При растяжении образцов кривая имеет минимум, обусловленный преждевременным разрушением части волокон с малой деформативностью; при сжатии кривая практически линейна, что говорит об ином механизме разрушения — потере устойчивости волокон по моде сдвига, что будет рассмотрено ниже.

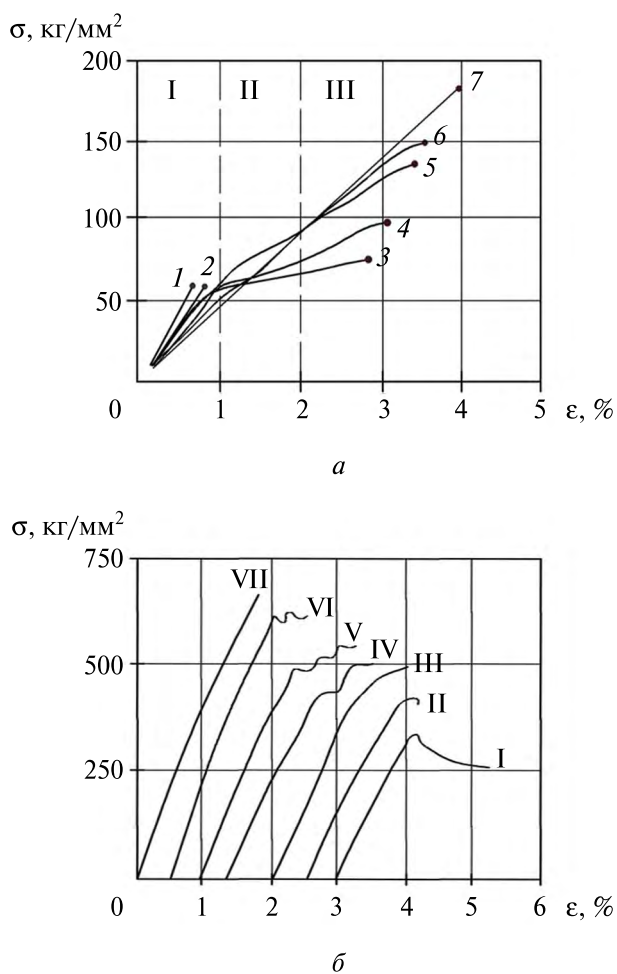


Рис. 1.5. Кривые напряжение — деформация при растяжении (а) и сжатии (б) кольцевых образцов стеклоуглепластиков в зависимости от соотношения содержания разномодульных волокон

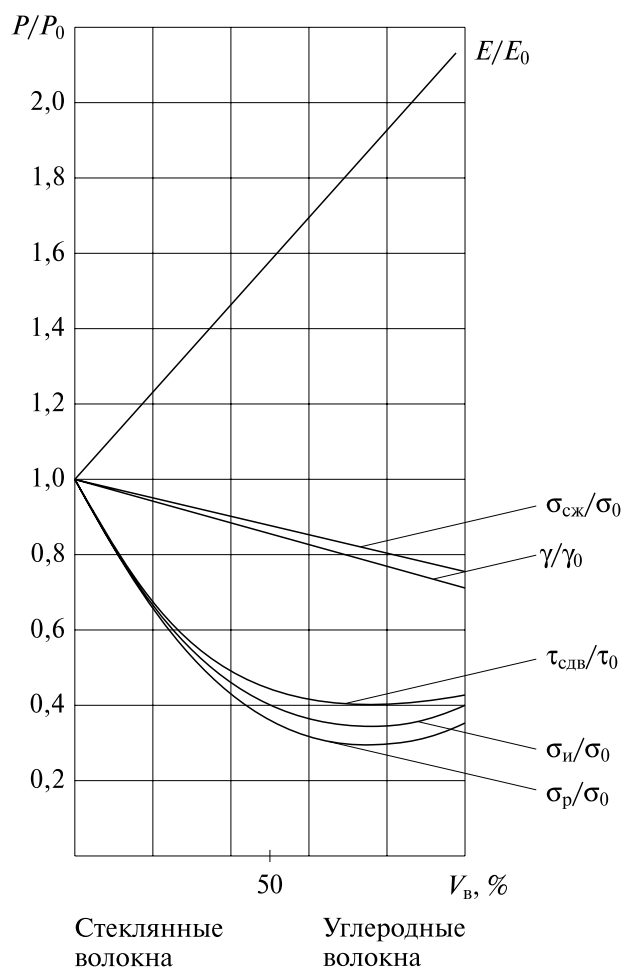


Рис. 1.6. Относительные величины модуля упругости E/E_0 , прочности при растяжении σ_r/σ_0 , при изгибе σ_i/σ_0 , прочности при сжатии $\sigma_{ск}/\sigma_0$, прочности при сдвиге $\tau_{сдв}/\tau_0$, плотности γ/γ_0 стеклоуглепластиков в зависимости от соотношения содержания стеклянных и углеродных волокон, имеющих различные модули упругости

1.3. Влияние свойств связующего на прочность армированных пластиков

Полимерная матрица обеспечивает монолитность армированных пластиков и совместное деформирование волокон. Кроме того, она чаще всего определяет эксплуатационные характеристики материалов: трещино-, тепло-, хемостойкость. Требования к связующим, исходя из соображений технологичности, повышения механических свойств и теплостойкости композитов, обычно весьма противоречивы. Работы, проводившиеся в ФИЦ ХФ РАН, касались всех сторон этой проблемы.

К вопросам технологичности следует отнести исследования реологических свойств, смачивания, пропитки волокнистых материалов растворами и расплавами полимеров, а также кинетики отверждения связующих. Освоены стандартные и разработаны оригинальные методики, необходимые для этих исследований [10; 11; 17].

Прочность композита существенно зависит от его структуры, напряженного состояния и непосредственно связана с механизмами разрушения материала, которые многообразны. Соответственно различаются и требования к связующему. Какой бы сложной ни была структура оболочки (однонаправленной, перекрестной или косоугольной), всегда основной нагрузкой в каждом слое является растяжение или сжатие вдоль волокон, которыми сопровождаются сдвиговые напряжения в матрице. В данном случае мы не будем останавливаться на описании конкретных механизмов разрушения композитов и связанных с ними требованиях к свойствам полимерной матрицы. Эти вопросы рассмотрены в других работах [1; 18–24]. Приведем лишь экспериментальные данные о влиянии свойств матрицы на свойства однонаправленных композитов. В табл. 1.1 сопоставляются в качестве примера характеристики двух типов эпоксидных связующих, существенно различающихся по свойствам, с прочностью при растяжении и сжатии стекло-, органо- и углепластиков. Видно, что повышение упруго-прочностных свойств матрицы существенно проявляется в увеличении прочности углепластиков при растяжении и прочности стекло- и углепластиков при сжатии. Эти результаты могут быть объяснены при анализе механизмов разрушения [25–27].

Таблица 1.1

Свойства полимерных связующих и однонаправленных композитов на их основе

Параметры	Тип матрицы	
	Эпоксидиановая	Эпоксирезорциновая
<i>Свойства матрицы</i>		
Модуль упругости E , ГПа	3,0	4,3
Прочность при растяжении σ_p , МПа	80	130
Прочность адгезионной связи со стекловолокном (сдвиг) $\tau_{адг}$, МПа	60	80
Предельная деформация растяжения ϵ_p , %	3,5	5,7
Объемная химическая усадка, %	1,5–2,0	3–5
<i>Стеклопластики</i>		
Прочность при растяжении, МПа	2060	2170
Прочность при сжатии, МПа	1180	1600
<i>Органоластики</i>		
Прочность при растяжении, МПа	2440	2580
Прочность при сжатии, МПа	450	460
<i>Углепластики</i>		
Прочность при растяжении, МПа	1400	1800
Прочность при сжатии, МПа	760	1100

Из табл. 1.1 видно, что все армированные полимеры заметно перекрывают требования, предъявляемые рассматриваемыми здесь изделиями к материалу, при его работе на растяжение. Но для работы на сжатие подходят лишь два материала — углепластик и стеклопластик. Здесь испытаны модели в виде тонких оболочек (колец). Это наиболее исследованные и корректные методы испытаний. Для проведения испытаний толстостенных моделей оболочек (колец) и исследования влияния масштабного фактора (толщины и диаметра) на прочностные параметры оболочек были разработаны специальные методы испытаний и обоснована их корректность. Последующие испытания позволили сделать следующие выводы. Прочность и модуль упругости (модуль Юнга) монолитных оболочек не зависят от масштабных факторов в пределах исследованных здесь размеров моделей оболочек (колец). При этом в испытаниях реализовывались предельно возможные прочностные параметры используемых в опытах стеклянных волокон.

Данные по исследованию влияния технологии формирования оболочки на сдвиговые характеристики материала оболочек приведены в третьей главе. Здесь только отметим, что технология оказывает существенное влияние на прочностные параметры материала модельной оболочки (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Влияние условий изготовления и испытания на прочность образцов композитов

Метод испытания и тип образца	Растяжение		Сжатие	
	σ_p	σ_p/σ_{max}	$\sigma_{сж}$	$\sigma_{сж}/\sigma_{max}$
Полудиски; кольца, вырезанные из оболочки	2040	0,76	640	0,36
Индивидуально изготовленные кольца	2200	0,84	800	0,44
Индивидуальные кольца, намотанные на испытательную оправку	2370	0,91	—	—
То же, с капроновыми манжетами	2400	0,93	—	—
24-кулачковое приспособление; индивидуально намотанные кольца	—	—	1150	0,64
72-кулачковое приспособление; индивидуально намотанные кольца	2520	1,0	1600	0,89
72-кулачковое приспособление с капроновыми манжетами	—	—	1800	1,00

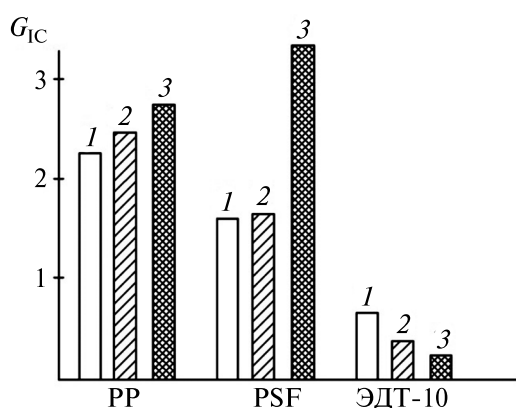


Рис. 1.7. Удельная вязкость разрушения G_{IC} стекло- (1), базальто- (2) и углепластиков (3) на основе полипропилена (PP), полисульфона (PSF) и эпоксидной матрицы ЭДТ-10

Помимо высоких упруго-прочностных характеристик связующих, используемых для получения композитов, важным их параметром является деформативность, которая определяет энергетические характеристики разрушения. Удельная вязкость разрушения G_{IC} композитов на основе реактопластов обычно невелика: 0,1–0,5 кДж/м². Это определяет их низкую трещиностойкость и необходимость предусматривать при расчете оболочек высокий коэффициент запаса прочности.

В 70–80-х гг. в разных странах были синтезированы теплостойкие термопласты: полиариленсульфоны, поликетоны, которые наряду с хорошими упруго-прочностными

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru