

6
A45

И Н С Т И Т У Т М Е Х А Н И К И П О Л И М Е Р О В
А К А Д Е М И Я Н А У К Л А Т В И Й С К О Й С С Р

На правах рукописи

ПОЛЯКОВ ВАЛЕНТИН ИВАНОВИЧ

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В НАМОТОЧНЫХ
ИЗДЕЛИЯХ ИЗ АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИКОВ

(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

И Н С Т И Т У Т М Е Х А Н И К И П О Л И М Е Р О В
А К А Д Е М И Я Н А У К Л А Т В И Й С К О Й С С Р

На правах рукописи

ПОЛЯКОВ ВАЛЕНТИН ИВАНОВИЧ

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В НАМОТОЧНЫХ
ИЗДЕЛИЯХ ИЗ АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИКОВ

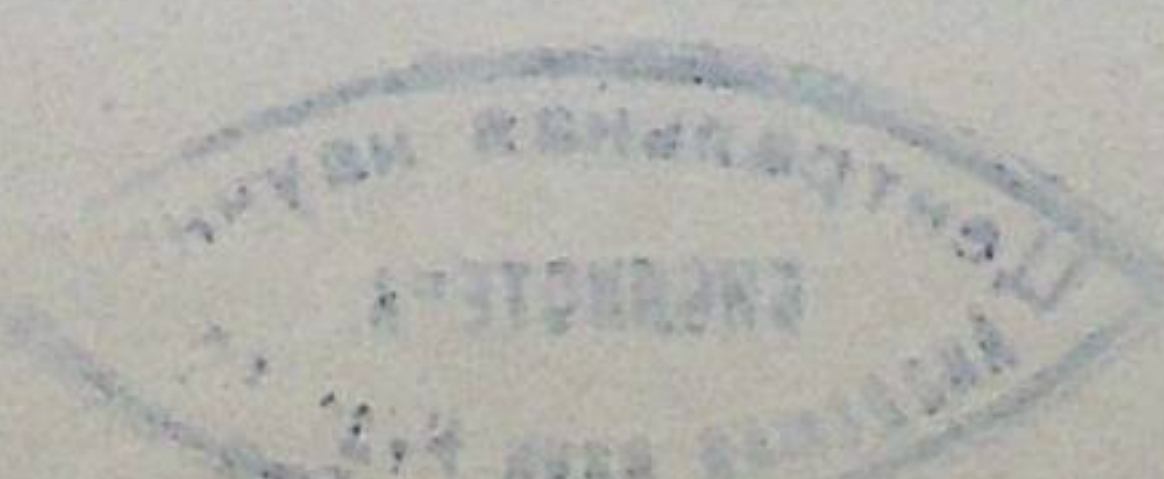
(01.02.03 – сопротивление материалов и
строительная механика)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

РИГА 1973



6
А45

620.11С

Работа выполнена

в Институте механики полимеров АН Латвийской ССР

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор К.М. Гарнопольский

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор В.В. Васильев (г. Москва)

кандидат технических наук, доцент К.С. Болотина (г. Москва)

Ведущая организация указана в решении Ученого Совета

Автореферат разослан "*17*" *сентября* 1973 г.

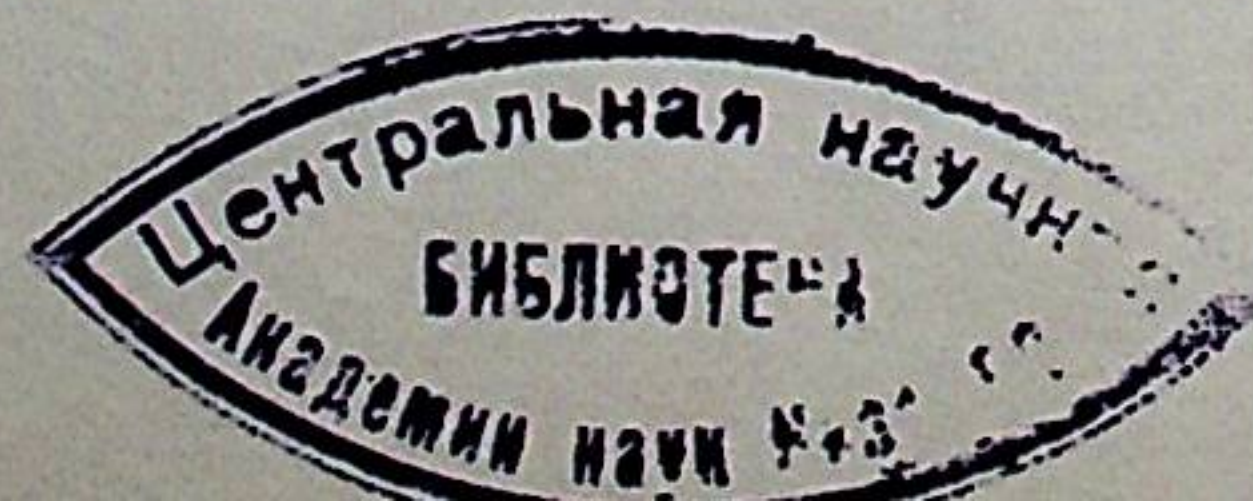
Защита диссертации состоится "*18*" *октября* 1973 г.

на заседании Ученого Совета Института механики полимеров
АН Латвийской ССР по адресу: г. Рига, ул. Айзкрауклес, 23.

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

Ученый секретарь Совета

кандидат технических наук Р.Д. Максимов



В настоящее время общепризнано, что механические свойства композиционных материалов и изделий из них в значительной степени определяются технологией их изготовления. Технологический режим изготовления определяет также величину и распределение макроскопических начальных напряжений в конструкции, которые могут существенно повлиять на её несущую способность. В особенности это относится к радиальным напряжениям, которые сильно снижают прочность изделия по отношению к локальным нагрузкам. Эти напряжения также могут вызвать снижение критической нагрузки при гидростатическом сжатии. Поэтому управление радиальными начальными напряжениями представляет большой практический интерес.

Из теории возникновения начальных напряжений в намоточных изделиях В.В. Болотина и К.С. Болотиной следует, что наиболее доступным способом управления начальными напряжениями является выбор соответствующих параметров режима изготовления. В связи с этим основной целью работы является исследование влияния технологических параметров и



новых технологических режимов на макроскопические радиальные начальные напряжения в намоточных изделиях.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, сводки результатов и списка литературы, содержащего 125 наименований. В первой главе дается обзор литературы, анализируются основные результаты работ, посвященных изучению процесса возникновения начальных напряжений и разработке методов их теоретической и экспериментальной оценке. Отмечаются важнейшие работы по исследованию микроскопических (А.Л.Абидов, М.Н.Бокин, Г.А.Ван Фо Фы, С.Д.Волков, Даниель, Дорелли, Г.А.Молодцов, М.С.Чирко и др.) и макроскопических начальных напряжений (В.Л.Бидерман, В.Л.Благонадежин, В.В.Болотин, К.С.Болотина, Р.Э.Бривманис, Г.А.Ван Фо Фы, Е.М.Варушкин, В.М.Инденбаум, Б.П.Макаров, Г.В.Мишенков, В.П.Николаев, В.Г.Перевозчиков, Г.Г.Портнов, Ю.Б.Спридзанс, Ю.М.Тарнопольский, Финк, Лью, Чамис и др.). Рассматриваются также работы родственного направления о термоупругих напряжениях в анизотропных телах (С.А.Амбарцумян, Б.И.Биргер, Г.А.Ван Фо Фы, И.И.Гольденблат, Д.М.Коляно, С.Г.Лехницкий, Е.А.Пакула, А.И.Уздалев и др.). Отмечается, что несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию начальных напряжений, некоторые аспекты задачи регулирования этих напряжений нуждаются в дальнейшем изучении.

Например, усилие натяжения ленты при намотке определяет ряд факторов, оказывающих непосредственное влияние на несущую способность конструкции. К ним относятся: степень искривленности волокон, межслойное давление, начальные напряжения и т.п. Запрограммировав соответствующим образом

закон изменения усилия натяжения в процессе намотки теоретически можно получить любое, наперед заданное распределение натяжения в витках изделия после намотки. Однако, в процессе разогрева изделия при термообработке первоначально запрограммированное распределение натяжения в витках существенно искажается вследствие перехода вязкого-текущее состояние и миграции от внутренних слоев к наружным. При этом возникает необходимость хотя бы в ориентировочной оценке величины падения натяжения при разогреве.

Определенный интерес представляет также исследование влияния технологических факторов на начальные напряжения в крупногабаритных толстостенных намоточных изделиях. Имеющиеся экспериментальные данные относятся в основном к небольшим, сравнительно тонкостенным кольцам, на которых практически невозможно смоделировать процессы теплообмена и теплопередачи при намотке и термообработке крупногабаритных изделий.

В последнее время сравнительно широкое распространение получили многослойные намоточные конструкции, в особенности трехслойные цилиндрические оболочки, в которых в качестве заполнителя используются пенопласты. Различие в свойствах слоев приводит к возникновению температурных напряжений, снижающих надежность этих конструкций. Используя силовую намотку можно в определенной степени компенсировать эти напряжения. Поэтому изучение особенностей возникновения начальных напряжений в таких конструкциях представляет практический интерес.

Мало изученными с точки зрения механики являются также технологические процессы, включающие в себя полимеризацию изделий в условиях воздействия дополнительного давления, хотя по зарубежным данным известно, что такие процессы широко используются для изготовления ответственных конструкций.

Во второй главе кратко излагается теория возникновения и расчета начальных напряжений в намоточных изделиях В.В.Болотина и К.С.Болотиной и теория намотки существенно анизотропных материалов Ю.М.Тарнопольского и Г.Г.Портнова, приводятся расчетные зависимости и обсуждаются особенности их применения.

Далее приводится вывод приближенных формул для оценки падения натяжения в витках намоточных изделий после разогрева в процессе термообработки. При этом процесс дальнейшей просадки витков вследствие перехода связующего в вязкотекучее состояние и его миграции от внутренних слоев к наружным и к торцам формально трактуется как результат изменения деформативных свойств полуфабриката в трансверсальном и окружном направлениях. Задача решается в линейно-упругой постановке, причем предполагается, что напряжения в полуфабрикате, обусловленные намоткой, после разогрева равняются сумме соответствующих напряжений после намотки (умноженных на отношение модулей упругости после разогрева к первоначальным) и напряжений, вызываемых дополнительными перемещениями витков. Эти перемещения определяются из решения соответствующей осесимметричной задачи для изделия с оправкой, находящихся в условиях плоского напряженного

состояния.

Полученные зависимости связывают напряжения в полуфабрикате после разогрева с начальной системой напряжений после намотки и параметрами, характеризующими степень изменения анизотропии упругих свойств материала и жесткость оправки. Для случая, когда податливость оправки существенно меньше податливости полуфабриката, а анизотропия упругих свойств материала велика, приводятся упрощенные формулы.

Далее обсуждаются границы применимости этих зависимостей, приводится пример расчета и сопоставление с известными экспериментальными данными по исследованию давления на оправку в процессе изготовления, анализируются влияние параметров анизотропии упругих свойств материала до и после разогрева на величину и характер падения натяжения в витках.

Полученные формулы используются для теоретической оценки эффективности силовой намотки с увеличением толщины изделий, изготавливаемых намоткой холодной ленты. Показано, что при прочих равных условиях намотка горячей лентой дает возможность более эффективно регулировать начальные напряжения.

В третьей главе приводятся результаты экспериментального исследования влияния параметров термообработки и режимов силовой намотки на начальные напряжения в толстостенных кольцах из стеклопластиков.

В качестве объекта исследования были выбраны кольца, изготовленные методом сухой намотки предварительно подогретой ленты из стеклоткани T_1 , пропитанной эпоксиднофенольным связующим ИФ ЭД-6 КГ, на неподогреваемую оправку диаметром 450мм.

Отношение наружного диаметра колец к внутреннему равнялось 1,6.

При термообработке варьировались скорость подъема температуры и скорость охлаждения, а также максимальная температура полимеризации связующего T_{II} . Время выдержки при температуре полимеризации во всех случаях не менялось.

Результаты исследований показали, что уменьшение скорости подъема температуры приводит к снижению величины начальных напряжений, если максимальная температура термообработки значительно выше температуры, при которой начинается полимеризация связующего. Аналогичный эффект отмечается, если снижать скорость охлаждения в интервале между температурой полимеризации и температурой стеклования связующего, когда склонность связующего к ползучести еще велика.

На величину начальных напряжений в кольцах, намотанных с незначительным натяжением, определенное влияние оказывают также характеристики теплового расширения оправки. Начальные напряжения в кольцах, намотанных на алюминиевую, стальную и комбинированную оправку (состоящую из стального цилиндра с намотанным на него и отвержденным слоем стеклопластика) оказались максимальными в первом случае. Для остальных оправок напряжения отличались незначительно. Это хорошо согласуется с расчетной оценкой влияния параметров этих оправок на начальные напряжения.

Таким образом, выбирая соответствующим образом параметры термообработки можно снизить величину начальных напряжений. Однако, эффективность этого способа недостаточна с увеличением толщины изделий.

Экспериментальное исследование влияния толщины изделий, отверждение которых проводилось при оптимальных режимах термообработки, на величину радиальных напряжений показало, что хотя фактические величины напряжений существенно ниже расчетных, при относительной толщине колец порядка 1,8 они уже превышают прочность материала в радиальном направлении.

Более эффективным способом регулирования начальных напряжений является силовая намотка. Анализ влияния режима намотки на начальные напряжения проводился при постоянном в процессе намотки усилии натяжения ленты, а также когда натяжение убывало или возрастало с увеличением числа наматываемых витков. При этом экспериментально полученные эпюры начальных напряжений сравнивались с расчетными, полученными при комбинации модели намотки Д.М.Тарнопольского и Г.Г.Портнова с моделью возникновения начальных напряжений В.В.Болотина и К.С.Болотиной.

Результаты исследования подтвердили ранее отмеченный в ряде работ вывод о благоприятном влиянии на начальные напряжения возрастающего при намотке натяжения ленты. При этом существенно, что экспериментально этот вывод подтверждался только при намотке горячей ленты на подогреваемую оправку, тогда как при намотке на холодную оправку влияние силовой намотки сказывалось очень незначительно (следует отметить, что в качестве образцов использовались сравнительно небольшие кольца с внутренним диаметром 150 мм и отношением наружного диаметра к внутреннему порядка 1,3). Таким образом, при силовой намотке крупногабаритных толстостенных изделий влияние температуры оправки на величину начальных напряже-

ний сказывается в гораздо меньшей степени.

Увеличение толщины детали обычно связано с повышением степени неоднородности упругих свойств по толщине стенки, что необходимо учитывать при экспериментальном определении начальных напряжений. Известно обобщение на этот случай метода Давиденкова. Однако этот метод, особенно применительно к толстостенным кольцам, сравнительно трудоемок. Поэтому в этой же главе приводится вывод расчетных формул для экспериментального определения начальных напряжений методом Закса, когда упругие свойства материала меняются по толщине стенки кольца.

В четвертой главе рассматриваются вопросы, связанные с исследованием начальных напряжений в многослойных конструкциях цилиндрической формы.

Конструктивная неоднородность этих изделий в сочетании с особенностями материалов и технологии их изготовления приводят к возникновению в них начальных напряжений. Поэтому необходимо хотя бы в первом приближении оценить возможности регулирования этих напряжений технологическим путем. С этой целью предварительно приводятся расчетные формулы для определения напряжений в изделиях с любым числом анизотропных слоев, изготавливаемых намоткой.

В качестве частного случая применения этих формул для анализа влияния режимов намотки на начальные напряжения рассматривается технологический прием, при котором намотка изделий сочетается с послойным отверждением. Приводится теоретическая оценка влияния режимов намотки в пятислойных

кольцах. Расчетные данные сопоставляются с экспериментальными. Показано, что послойная намотка является весьма эффективным способом регулирования начальных напряжений в толстостенных изделиях.

Далее анализируется механизм возникновения начальных напряжений в трехслойных намоточных изделиях, когда в качестве заполнителя используются жесткие пенополиуретаны. Показано, что если толщина несущих слоев мала и их намотка ведется с малым натяжением, основной причиной возникновения начальных напряжений является усадка пенопласта. При этом можно оценивать их величину с помощью элементарного и общеизвестного решения соответствующей задачи термоупругости, вводя вместо коэффициента линейного расширения пенопласта параметр, характеризующий его усадку. Этот вывод сделан на основании экспериментального изучения кинетики усадки пенопласта в процессе термообработки и зависимостей его механических свойств от температуры.

Усадочные напряжения, практически не влияя на прочность несущих слоев, соизмеримы с прочностью пенопласта, кроме того, вследствие сравнительно малой жесткости большинства композитных материалов они могут служить причиной существенного отклонения размеров изделия от проектных. Поэтому для оценки возможности их регулирования проведено экспериментальное исследование на моделях трехслойных оболочек влияния конструктивных и технологических факторов на величину начальных напряжений. При этом варьировались толщина несущих слоев из стеклопластика, толщина слоя пенопласта и его плотность, натяжение при

намотке несущих слоев.

Для экспериментального определения начальных напряжений в многослойных кольцах (с использованием идеи метода Закса) в конце главы приводятся соответствующие формулы, когда число слоев может быть любым. Расчетные зависимости представлены в виде, удобном для обработки на ЭЦВМ. Для трехслойных изделий с тонкими несущими слоями приведены приближенные формулы, выведенные с использованием широко распространенных гипотез в расчетах трехслойных конструкций.

В пятой главе изучаются особенности механики формования намоточных изделий, полимеризация которых производится в условиях воздействия дополнительного давления.

Предварительно рассматриваются известные способы создания дополнительного давления, дается их классификация, обсуждаются возможные модели деформирования полуфабриката при различных схемах нагружения. При этом дается вывод о возможности наличия по крайней мере двух качественно отличных механизмов деформирования полуфабриката: когда армирующие слои или волокна деформируются не теряя устойчивости, и когда дальнейшая просадка витков сопровождается потерей устойчивости. Если толщина армирующих слоев пренебрежимо мала по сравнению с характерными размерами изделия (что обычно имеет место для стеклопластиков), потеря устойчивости наступает практически сразу же после того, как натяжение в слое исчезнет вследствие действия внешнего давления, что приводит к изменению анизотропии деформативных характеристик полуфабриката. Косвенно этот момент можно зафиксировать по изменению зависимости давления на оправку от величины внеш-

него давления. На основании этих данных можно также оценить анизотропию упругих свойств полуфабриката.

Экспериментальная проверка этих предположений проводилась на кольцах, образованных намоткой предварительно пропитанной связующим, неподогреваемой в процессе намотки тканой лентой. При этом варьировалась толщина колец и величина натяжения при намотке. Оказалось, что наиболее существенное влияние на характер деформирования полуфабриката оказывает величина прикладываемого давления. С увеличением давления параметр, характеризующий анизотропию деформативных свойств, уменьшается в несколько раз и по величине приближается к аналогичному параметру в отвержденном изделии. Следует отметить, что в этих опытах давление на оправку в диапазоне изменения внешнего давления от нуля до 40 атм составляло не более 50 % от величины внешнего давления.

Аналогичные опыты, проведенные на специальном приспособлении с подогреваемыми в процессе намотки тканой и однонаправленной лентой показали, что хотя зависимость давления на оправку от внешнего давления сохраняет свой вид, однако абсолютные величины давления на оправку и внешнего давления близки. Это свидетельствует (для выбранных параметров изделия) о сравнительно малой анизотропии упругих свойств.

Следует отметить, что малая анизотропия упругих свойств может наблюдаться и при обычных способах формования намоточных изделий, образуемых намоткой предварительно

подогретых волокнистых композитов, когда связующее в значительной степени отжимается еще в процессе намотки. Это показывают опыты по замеру давления на оправку в процессе термообработки образцов, при изготовлении которых в качестве армирующего наполнителя использовалась однонаправленная лента ЛСБ-Г, подогреваемая в процессе намотки. В частности эти же опыты указывают на необходимость учета температурных напряжений, возникающих на этапе разогрева подобных изделий в процессе термообработки при расчете начальных напряжений.

Для оценки эффективности различных технологических приемов, включающих в себя полимеризацию под давлением, проведен численный анализ влияния конструктивных и технологических параметров на распределение напряжений в полуфабрикате (при этом за критерий эффективности принята относительная величина межслойного давления) в процессе формования. Рассмотрено также влияние дополнительного давления на начальные напряжения.

СВОДКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ.

1. Проведено систематическое исследование влияния технологических и конструктивных параметров на начальные напряжения в намоточных изделиях из армированных пластиков.
2. Разработан приближенный инженерный метод расчета падения натяжения в витках изделий, изготавливаемых намоткой холодной ленты, после разогрева в процессе термообработки.

3. Приведен сравнительный анализ влияния относительной толщины изделий на эффективность силовой намотки в случаях, когда намотка производится холодной лентой.
4. Проведено исследование влияния параметров термообработки, оправки и режимов силовой намотки на начальные напряжения в толстостенных крупногабаритных кольцах из стеклопластика. Показано, что варьируя параметры термообработки и режимы силовой намотки можно существенно снизить максимальную величину радиальных напряжений в отвержденном изделии. При этом установлено, что в отличие от сравнительно небольших тонкостенных изделий, силовая намотка существенно влияет на распределение начальных напряжений при намотке и на неподогреваемую оправку.
5. Разработаны методики экспериментального определения начальных напряжений в толстостенных кольцах с переменными по толщине стенки модулями упругости и многослойных кольцах, которые являются обобщением метода Закса.
6. Установлена возможность эффективного регулирования начальных напряжений в толстостенных намоточных изделиях методом послойного отверждения в сочетании с силовой намоткой. Проведено исследование влияния режимов намотки на начальные напряжения в них при намотке с послойным отверждением.
7. Изучен процесс возникновения начальных напряжений в трехслойных конструкциях, когда в качестве заполнителя используются жесткие пенополиуретаны. Исследована кинетика усадки пенопластов в процессе термообработки и зависимость их механических свойств от температур. Предложен

метод приближенной оценки усадочных напряжений и проведено исследование влияния конструктивных и технологических параметров на величину начальных напряжений.

8. Исследованы особенности механики формования намоточных изделий с дополнительным давлением. Установлено наличие двух механизмов деформирования полуфабриката при действии внешнего давления. Вывод подтвержден анализом экспериментальных данных по замерам давления на оправку при опрессовке внешним давлением в процессе термообработки.
9. Приведен численный анализ влияния конструктивных и технологических факторов на распределение напряжений в полуфабрикаты и влияния дополнительного давления на начальные напряжения.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих статьях:

1. Бидерман В.Л., Дмитриенко И.П., Поляков В.И., Сухова Н.А. Определение остаточных напряжений при изготовлении колец из стеклопластика. Механика полимеров, 1969, № 5.
2. Варушкин Е.М., Поляков В.И., Лапин Ю.А. Экспериментальное исследование влияния технологических параметров на остаточные напряжения в толстостенных намоточных изделиях. Механика полимеров, 1972, № 1.
3. Поляков В.И., Спридзанс Ю.Б. Намотка волокнистых композитов с дополнительным давлением. Механика полимеров, 1972, № 5.

