

На правах рукописи



Каланчук Олег Эрихович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ
ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРНЫХ ПАРАШЮТНЫХ СТРОП**

Специальность:

05.19.01 - материаловедение производств текстильной и легкой промышленности



Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна"

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор
Макаров Авинир Геннадьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Цобкалло Екатерина Сергеевна

кандидат технических наук,
доцент
Горшков Александр Сергеевич

Ведущая организация: ООО Институт технических суков,
г. Санкт-Петербург

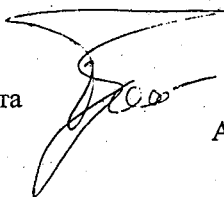
Защита диссертации состоится "21" сентября 2010 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.236.01 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна" по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18, ауд. 241.

Текст автореферата размещен на сайте СПбГУТД: <http://www.sutd.ru>

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан "20" августа 2010 г.

Учёный секретарь диссертационного совета



А.Е. Рудин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы обоснована необходимостью изучения деформационных свойств материалов, применяемых в парашютостроении, где используются технические изделия в виде тканых лент, шнуров и тканей из синтетических нитей. При эксплуатации указанные материалы, как правило, подвергаются большим нагрузкам, действующим в течение малых времен. При этом максимальная эксплуатационная нагрузка принимает значения до 30% от разрывного усилия. Работоспособность реальных изделий, в основном, определяется деформационными свойствами используемых материалов. Исследования деформационных свойств составляют одну из основных задач текстильного материаловедения. Современные методы оценки деформационных свойств и прогнозирования деформационных процессов основаны на математическом моделировании одноименных процессов, которое возможно лишь на основе учета экспериментальных данных. Для моделирования деформационных свойств часто бывает достаточным проведение кратковременного эксперимента, что, несомненно, облегчает и удешевляет исследования. Выборочный повторный эксперимент бывает необходим для подтверждения адекватности построенной математической модели деформационных свойств и определения степени достоверности прогнозирования одноименных процессов.

Известные и широко применяемые в настоящее время методики прогнозирования деформационных процессов синтетических волокон и нитей не всегда применимы для исследования аналогичных свойств текстильных материалов более сложной макроструктуры типа шнуров, лент, тканей и т.п. Указанная сложность исследования вызвана тем, что механическое поведение таких материалов зависит не только от деформационных свойств образующих материал нитей, но и от структуры переплетения нитей в материале и других геометрических факторов.

Особую актуальность имеют исследования и прогнозирования деформационных свойств парашютных стоп, относящихся к классу вязкоупругих твердых тел, в области действия неразрушающих нагрузок, близких к условиям их эксплуатации, т.к. для эксплуатации парашютов первоочередную роль играет его надежность, исключая разрушение парашюта силовыми нагрузками. Такие исследования возможны на основе математического моделирования процессов деформирования, которые включают в себя как вязкоупругую релаксацию, так и вязкоупругую ползучесть.

Разработка численных методик расчета деформационных процессов парашютных стоп и - на их основе - компьютерных программ неразрывно связано с решением задач по сравнительному анализу свойств материалов, с исследованиями взаимосвязи свойств со структурой, с целенаправленным

технологическим регулированием свойств, а также с прогнозированием кратковременных и длительных механических воздействий.

На изучаемые деформационные свойства парашютных строп оказывают влияние различные факторы. Среди них основными являются: температурные воздействия, влажность, различные погодные условия, а также уровни длительности механических воздействий.

Для сравнительного анализа и прогнозирования деформационных свойств парашютных строп необходима разработка адекватной математической модели на основе физически обоснованного аналитического описания вязкоупругости. Следует заметить, что изучение механических свойств парашютных строп, проявляющихся в условиях эксплуатации, гораздо сложнее, чем измерение только лишь разрывных характеристик, по которым нельзя получить полноценную объективную оценку свойств материала. Особую ценность имеет решение задачи прогнозирования деформационных процессов для парашютных строп, когда помимо сопоставления и механических свойств, приходится учитывать и условия эксплуатации.

Появление современных материалов для изготовления парашютных строп обосновывает поиск новых математических моделей деформационных свойств и применение для их исследования соответствующих компьютерных методов обработки экспериментальной информации. Создание новых методов исследования механических свойств парашютных строп способствует повышению достоверности прогнозирования деформационных процессов.

Работа выполнялась в рамках тематического плана министерств образования и науки РФ 2009 года «Лентек. 1.1.09. «Компьютерное моделирование, прогнозирование и методы исследования механически вязкоупругих свойств технического текстиля. Фундаментальные исследования»», а также в рамках грантов аналитической целевой ведомственной программы министерства образования и науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы 2009-2010 гг.» 2.1.2/4466 «Развитие концепции создания комбинированных и многослойных структур на основе анизотропных волокнистых элементов и разработка физических биохимических методов оптимизации их функциональных свойств», 2.1.2/327 «Разработка методов решения актуальных нелинейных задач механики мягких оболочек, армированных текстильными структурами».

Цель работы состоит в разработке комплекса компьютерных методов исследования вязкоупругих свойств и прогнозирования деформационных процессов парашютных строп на основе математического моделирования вязкоупругости.

Основными задачами исследования являются:

- разработка компьютерных методик прогнозирования релаксации и ползучести парашютных строп;

- разработка компьютерных методик прогнозирования деформационных и восстановительных процессов парашютных строп;

- разработка программного обеспечения, позволяющего производить расчет упругих, вязкоупругих и пластических компонент деформации, а также, соответствующих им компонент механической работы деформирования парашютных строп;

- сравнительный анализ вязкоупругих свойств парашютных строп и выявление влияния геометрических характеристик, линейной плотности, способа переплетения прядей, компонентного состава и др. на их деформационные свойства.

Методы исследования. Теоретической и методологической основой исследования явились классические и современные научные представления, разработки и положения, применяемые в текстильном материаловедении с использованием закономерностей, изложенных в физике, физико-химии полимеров, механике и термодинамике. Широко используются различные математические методы (интегральные уравнения, уравнения математической физики, численные методы и др.), а также методы вычислительной математики и информатики.

Научная новизна работы состоит:

- в разработке компьютерной методики прогнозирования релаксационных процессов парашютных строп на основе математического моделирования вязкоупругости по результатам кратковременного эксперимента на простую релаксацию;

- в разработке компьютерной методики прогнозирования процессов ползучести парашютных строп на основе математического моделирования вязкоупругости по результатам кратковременного эксперимента на простую ползучесть;

- в разработке компьютерных методик прогнозирования деформационно-восстановительных процессов и процессов обратной релаксации парашютных строп на основе математического моделирования вязкоупругости по результатам кратковременных экспериментов на простую релаксацию и простую ползучесть;

- в разработке компьютерных методик разложения полной деформации и механической работы деформирования парашютных строп на упругую и вязкоупруго-пластическую компоненты на основе математического моделирования вязкоупругости по результатам кратковременных экспериментов на простую релаксацию и простую ползучесть;

- в разработке программного обеспечения (см. список официально зарегистрированных программ [9-12]), являющегося составной частью целостного комплекса программ по изучению вязкоупругих свойств и прогнозирования деформационных процессов парашютных строп.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработан методики и соответствующее программное обеспечение, позволяющие производить:

- прогноз релаксационных процессов и вязкоупругой ползучест парашютных строп;
- прогноз деформационных и восстановительных процессов парашютны строп;
- расчет компонент деформации и полной механической работ деформирования парашютных строп с целью получения рекомендаций по и применимости, в зависимости от преобладания упругих или вязкоупруго пластических свойств;
- качественный отбор изделий по параметрам математической модел вязкоупругости парашютных строп, зависящим от компонентного состав изделия, линейной плотности, геометрических характеристик и т.п.

Материалы диссертации используются в учебном процессе на кафедр интеллектуальных систем и защиты информации СПГУТД, в научны исследованиях лаборатории информационных технологий СПГУТД, а также при курсовом и дипломном проектировании.

Апробация результатов работы. Результаты работы докладывались и международных научно-технических симпозиумах и конференциях: Международный симпозиум "Перспективные материалы и технологии" (Витебск, Республика Беларусь, 2009), V Международная конференция "Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений" (Тамбов, 2010).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 печатных работ, среди которых 4 статьи в рецензируемых журналах из "Перечня ВАК РФ...", 4 свидетельства об официальной регистрации программ в Российском агентстве по патентам и товарным знакам.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы (178 наименований) и приложений. Основное содержание диссертации изложено на 122 страницах машинописного текста, иллюстрировано 46 рисунками и содержит 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности развиваемого научного направления, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В основе исследования механических свойств и прогнозирования деформационных процессов парашютных строп лежит математическое моделирование вязкоупругости на основе данных краткосрочного

эксперимента на простую релаксацию или простую ползучесть. Одним из развиваемых в лаборатории информационных технологий СПУТД вариантов математического моделирования вязкоупругости полимеров является вариант, основанный на аналитической аппроксимации экспериментальных "семейств" кривых релаксации и ползучести с помощью различных нормированных релаксационных функций и функций запаздывания по логарифмической шкале приведенного времени. С каждым годом растет разнообразие полимерных материалов, обладающих той или иной молекулярной и надмолекулярной структурой, и проявляющих, в силу сказанного, те или иные деформационные свойства. Поэтому постоянно увеличивается и количество математических моделей, учитывающих ту или иную специфику полимерного материала. В работах (Сталевич А.М., Демидов А.В., Макаров А.Г.) рассматривается целый спектр таких математических моделей, основанных на аппроксимации экспериментальных "семейств" релаксации и ползучести различными нормированными функциями. В частности, показано, что, если для математического моделирования вязкоупругих свойств полимерных материалов относительно простой макроструктуры типа нитей и волокон достаточно использовать в качестве нормирующей функции интеграл вероятности или нормированный гиперболический тангенс, то для полимерных материалов сложной макроструктуры, к которым следует отнести парашютные стопы, целесообразно использовать функцию нормированный арктангенс логарифма приведенного времени (НАЛ), которая задает вероятностное распределение Коши, главным достоинством которого является свойство замкнутости относительно операции сложения случайных величин (то есть сумма случайных величин, распределенных по закону Коши, также распределена по этому закону). Из этого важного свойства закона распределения Коши следует, что деформационные процессы как составных частей парашютных строп (нитей, волокон), так и самих парашютных строп в целом, могут быть описаны одной математической моделью, в основе которой лежит функция НАЛ, что существенно упрощает процесс математического моделирования вязкоупругости.

Учитывая сказанное, математическое моделирование процессов релаксации и ползучести парашютных строп проводилось на основе нормированной функции НАЛ. Одним из основополагающих достоинств, предлагаемой математической модели вязкоупругости, является выполнение требования к наименьшему числу параметров-характеристик модели и их физическая обоснованность. К тому же выбранная модель вязкоупругости обладает достаточной простотой, достигаемой за счет учета нелинейности в интегральных ядрах релаксации и запаздывания (времена релаксации и запаздывания вводятся как параметры модели), а не за счет усложнения самого ядра.

В первой главе дается обзор научной литературы по тематике диссертации. Приводятся известные подходы к исследованию деформационных свойств полимерных материалов (Колтунов М.А., Работнов Ю.Н., Ржаницин А.Р.). Описаны варианты моделирования вязкоупругих свойств и прогнозирования деформационных процессов в зоне действия неразрушающих механических воздействий (Кукин Г.Н., Николаев С.Д., Романов В.Е., Соловьев А.Н., Щербаков В.П., Труевцев Н.Н.). Указаны аспекты применения математических методов (Больцман С., Вейерштрасс К., Вольтерра В., Лаплас П., Максвелл Дж.) и вычислительной техники при исследовании деформационных свойств полимерных материалов.

Во второй главе дается описание объектов исследования - полимерных нитей, применяемых в парашютных стропах (табл.1) и парашютных строп (табл.2).

Таблица 1. Технические характеристики полимерных нитей, применяемых в парашютных стропах

Материал	Линейная плотность, текс	Удлинение при разрыве, %	Разрывное напряжение, ГПа	Модуль упругости, ГПа
Дакрон	117	10,8	0,78	8,6
Микролайн (Spectra)	98	3,1	3,2	110
Вектран	132	3,5	3,4	104
Текнора (High Modulus Aramid)	110	4,2	3,3	75

Таблица 2. Технические характеристики парашютных строп

Название	Разрывная нагрузка, кН	Удлинение при разрыве, %	Модуль упругости, кН	Состав
Дакрон-1200	5,4	15,1	42	дакрон - 100%
Спектра-550	2,5	16,4	18	микролайн - 100%
Спектра-725	3,3	16,9	23	микролайн - 100%
Спектра-825	3,7	17,1	26	микролайн - 100%
Спектра-1000	4,5	17,2	31	микролайн - 100%
Вектран-800	3,6	13,6	32	вектран - 100 %
НМА-1100	5,0	19,3	31	текнора - 100 %
НМА-1600	7,3	19,8	44	текнора - 100 %

В главе описывается также приборная база – устройства, с помощью которых проводились испытания образцов на деформационные свойства. Приводятся разработанные методики расчета характеристик релаксации и

ползучести, а также, созданное на их основе, программное обеспечение.

Математическое моделирование вязкоупругости парашютных строп и образующих их нитей, изучаемых в работе, проводилось на основе релаксационной функции и функции запаздывания (ползучести) в виде НАЛ. При этом математические модели имеют вид

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_{n\varepsilon}} \left(\ln \left(\frac{t}{t_1} \right) + \ln \left(\frac{t_1}{\tau_\varepsilon} \right) \right) \right) \right) - \quad (1)$$

для релаксации и

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_\infty - D_0) \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_{n\sigma}} \left(\ln \left(\frac{t}{t_1} \right) + \ln \left(\frac{t_1}{\tau_\sigma} \right) \right) \right) \right) - \quad (2)$$

для ползучести, где t - время, $1/b_{n\varepsilon}$ - параметр интенсивности процесса релаксации, $1/b_{n\sigma}$ - параметр интенсивности процесса ползучести, τ_ε - время релаксации (время за которое проходит половина процесса релаксации при величине деформации ε), τ_σ - время запаздывания (время за которое проходит половина процесса ползучести при величине напряжения σ), $E_{\varepsilon t} = \sigma/\varepsilon$ - модуль релаксации, E_0 - модуль упругости, E_∞ - модуль вязкоупругости, $D_{\sigma t} = \varepsilon/\sigma$ - податливость, D_0 - начальная податливость, D_∞ - предельная равновесная податливость, ε - деформация, $\sigma = F/S$ - напряжение, F - усилие при растяжении, S - площадь поперечного сечения образца, t_1 - базовое время.

Использование нормированной функции НАЛ в качестве основы математической модели вязкоупругости, позволяет с достаточной степенью точности моделировать деформационные свойства парашютных строп и нитей из которых они образованы. Указанное моделирование расширяет деформационно-временные и сило-временные границы прогнозирования деформационных процессов за счет достаточно медленной сходимости функции НАЛ к своим асимптотическим значениям. Аналитическое задание функции НАЛ и принадлежность ее к классу элементарных функций упрощает дифференциально-интегральные преобразования в рамках рассматриваемой математической модели и облегчает процесс нахождения вязкоупругих характеристик.

В третьей главе рассмотрено прогнозирование деформационных процессов на основе интегральных соотношений Больцмана-Вольтерра, которые с учетом математических моделей (1), (2), принимают вид

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \int_0^t \varepsilon_\theta \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon,t-\theta}^2} \cdot \frac{1}{t-\theta} d\theta - \quad (3)$$

для нелинейно-наследственной релаксации и

$$\varepsilon_t = D_0 \sigma_t + (D_\infty - D_0) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \int_0^t \sigma_\theta \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma,t-\theta}^2} \cdot \frac{1}{t-\theta} d\theta - \quad (4)$$

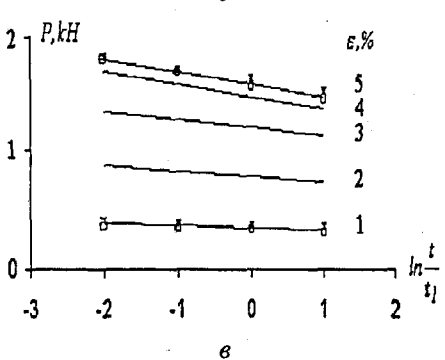
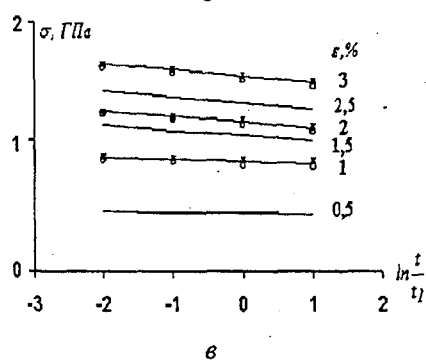
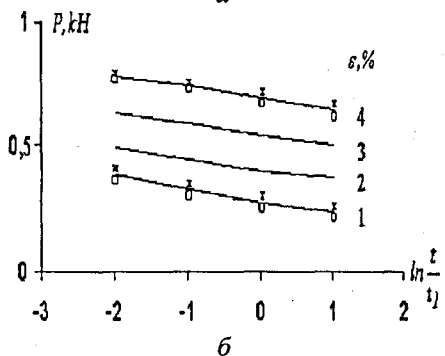
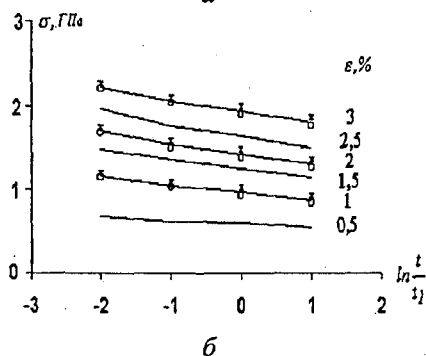
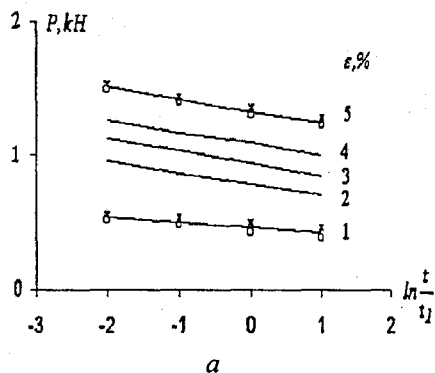
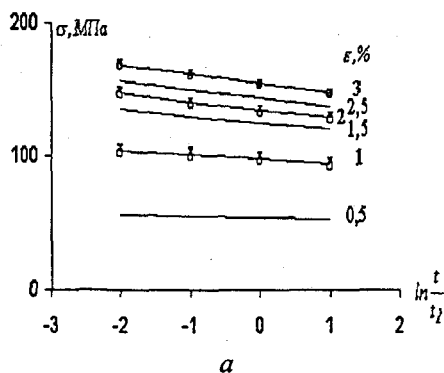


Рис. 1. "Семейства" кривых релаксации напряжений при различной деформации синтетических нитей, $T = 20^{\circ}\text{C}$:
 а - дакрон 117 текс,
 б - вектран 132 текс,
 в - текнора 110 текс.

Рис. 2. "Семейства" кривых релаксации напряжений при различной деформации парашютных строп, $T = 20^{\circ}\text{C}$:
 а - дакрон-1200,
 б - вектран-800,
 в - НМА-1600.

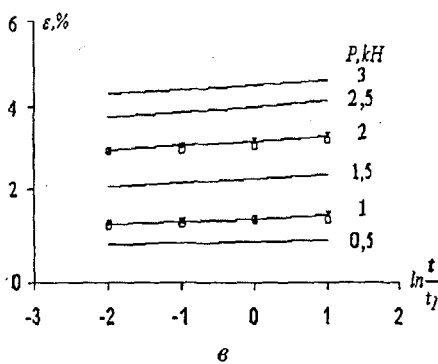
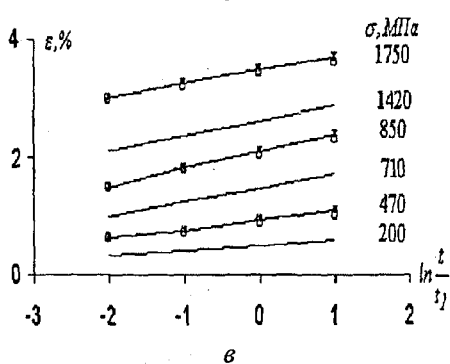
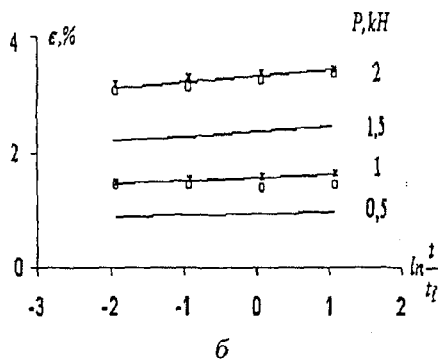
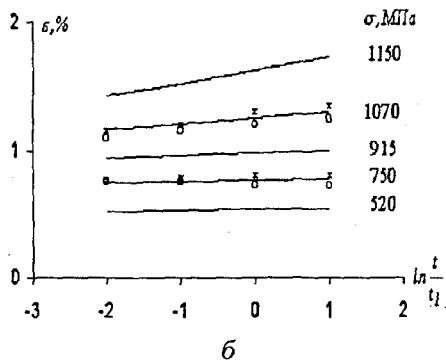
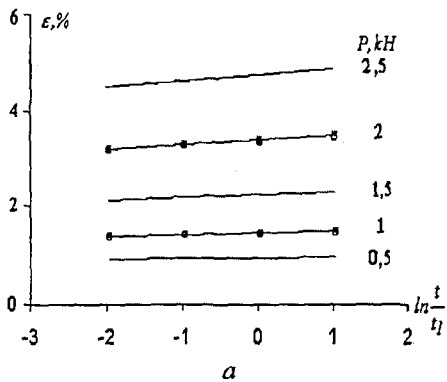
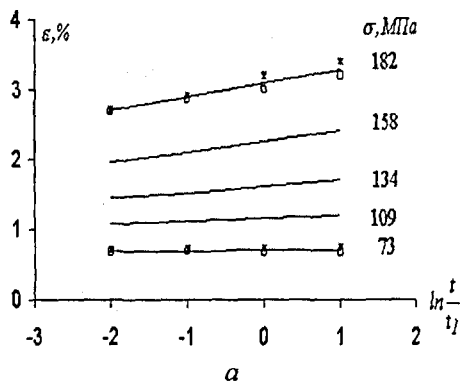


Рис. 3. "Семейства" кривых ползучести при различной нагрузке синтетических нитей, $T = 20^{\circ}\text{C}$:
 а - дакрон 117 текс,
 б - вектран 132 текс,
 в - текнора 110 текс.

Рис. 4. "Семейства" кривых ползучести при различной нагрузке парашютных строп, $T = 20^{\circ}\text{C}$:
 а - дакрон-1200,
 б - вектран-800,
 в - НМА-1600.

для нелинейно-наследственной ползучести, где $W_{\epsilon t} = \frac{1}{b_{nc}} \left(\ln \left(\frac{t}{t_I} \right) + \ln \left(\frac{t_I}{\tau_{\epsilon}} \right) \right)$,

$$W_{\sigma t} = \frac{1}{b_{nc\sigma}} \left(\ln \left(\frac{t}{t_I} \right) + \ln \left(\frac{t_I}{\tau_{\sigma}} \right) \right).$$

Преимущество применения для моделирования деформационных процессов интегральных соотношений (3), (4), как следствие математической модели (1), (2), состоит в возможности расширения области доверительного прогнозирования в сторону "больших" (длительные процессы) и в сторону "малых" времен (кратковременные процессы) с уменьшением погрешности прогноза за счет снижения влияния квазимгновенного фактора деформирования в начале процесса. Прогнозирование деформационного поведения материала на "малые" времена особенно важно для эксплуатации парашютных строп, так как от момента раскрытия парашюта (начал деформационного процесса) во многом зависит безопасность и жизнь парашютиста. Прогнозирование деформационных процессов на "большие" времена также актуально, так как позволяет определить степень надежности парашюта при затяжных прыжках и при спуске на парашютах тяжело техники.

Разработанные методы вычисления интегралов, входящих в соотношения (3), (4), с учетом специфики математических моделей (1), (2) соответствующее программное обеспечение опробованы на различных видах деформационных процессов (рис.1 - рис.4). Близость расчетных точек экспериментальным значениям наблюдается для всех рассмотренных материалов.

В четвертой главе рассмотрены компьютерные методики разделения полной деформации и механической работы деформирования на компоненты. Хотя такое разделение весьма условно, но оно позволяет проанализировать упругие и вязкоупруго-пластические свойства материалов. С одной стороны парашютные стропы должны обладать упругой составляющей деформации обеспечивающей быстрое восстановление их упруго-деформационных свойств а с другой стороны, наличие вязкоупруго-пластической составляющей деформации позволяет гасить вредные механические воздействия на организм парашютиста и на спускаемую с парашютом технику, уменьшая силовые перегрузки.

Предлагается следующее разложение полной деформации ϵ_t на упругую ϵ_y и вязкоупруго-пластическую ϵ_{vp} компоненты на основе интегрального соотношения (3):

$$\epsilon_y = \epsilon_t - (1 - E_{\infty} E_0^{-1}) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{nc}} \cdot \int_0^t \epsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{1 + W_{\epsilon t}^2} \cdot \frac{1}{t} ds, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{vp} = (1 - E_{\infty} E_o^{-1}) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{нс}} \cdot \int_0^l \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{1 + W_{et}^2} \cdot \frac{1}{t} \cdot ds. \quad (6)$$

Компьютерные методики разделения полной деформации на компоненты основаны на численном расчете процессов растяжения парашютных строп (5), (6).

Пятая глава посвящена применению методов, разработанных в диссертационной работе для решения задач по сравнительному анализу деформационных свойств парашютных строп, для исследования взаимосвязи указанных свойств со структурой и их целенаправленного технологического регулирования, а также для расчетного прогнозирования кратковременных и длительных механических воздействий.

Проведенный анализ деформационных характеристик парашютных строп выявил влияние геометрических факторов, линейной плотности и компонентного состава на их деформационные свойства.

Сравнивая расчетные деформационные характеристики для образцов парашютных строп разного компонентного состава, при прочих однотипных условиях, получаем, что наиболее интенсивно деформационные процессы протекают в парашютных стропах, изготовленных из материала дакрон. Отличительной чертой парашютных строп изготовленных из дакрона является значительное преобладание упругой составляющей деформации над вязкоупруго-пластической. На практике это означает, что такие стропы медленнее изнашиваются, "пружинят" на раскрытии, что заметно смягчает удар и более комфортно для парашютистов. Исходя из анализа деформационных характеристик, парашютные стропы, изготовленные из дакрона, рекомендуется применять в больших парашютах и в парашютах для пуска тяжелой техники.

Анализируя деформационные характеристики парашютных строп, изготовленных из микролайна, получаем, что существенное влияние на деформационные процессы, в отличие от других изучаемых материалов, оказывает температура. При повышении температуры упругие свойства строп уменьшаются, а вязкоупруго-пластические увеличиваются. Это оказывает существенное влияние и на уменьшение срока службы парашютов с ростом температуры.

В работе проанализирована также зависимость деформационных свойств парашютных строп, изготовленных из одного и того же материала, но имеющих разные геометрические характеристики на примере микролайна и акрона. Чем меньше толщина строп - тем более интенсивно проходят деформационные процессы, что сказывается на маневренности парашютов. Поэтому рекомендуется маневренные и высокоскоростные парашюты оснащать более тонкими стропами, несмотря на их более быстрый износ.

Деформационные процессы парашютных строп, изготовленных и текноры имеют наименьшую интенсивность, по сравнению с другим рассматриваемыми материалами.

Применение разработанных методов на практике заметно упрощает благодаря автоматизация вычислений с помощью соответствующего программного обеспечения. Объединение программ в единый программный комплекс с общим интерфейсом определяет их универсальность и возможность параллельного использования при моделировании деформационных свойств парашютных строп.

ВЫВОДЫ

1. Разработанные методы и компьютерные методики прогнозирования релаксации парашютных строп на основе предлагаемой математической модели релаксации позволяют с большой степенью точности рассчитывать характеристики релаксации.

2. Разработанные методы и компьютерные методики прогнозирования ползучести парашютных строп на основе предлагаемой математической модели ползучести позволяют с большой степенью точности рассчитывать характеристики ползучести.

3. Разработанные методы и компьютерные методики прогнозирования деформационных процессов на основе предлагаемых математических модели релаксации и ползучести позволяют с большой степенью надежности прогнозировать указанные процессы парашютных строп, что подтверждено данными эксперимента.

4. Разработанные методы и компьютерные методики разделения полн деформации на компоненты позволяют производить оценки упругих вязкоупруго-пластических свойств парашютных строп, играющих важную роль при отборе материалов, обладающих требуемыми деформационными свойствами.

5. Разработанные методы и компьютерные методики определения деформационных характеристик парашютных строп позволяют производить технологический отбор материалов и давать рекомендации по их техническому использованию.

6. Все разработанные компьютерные методики, опробованные на большой группе парашютных строп и образующих их синтетических ните дали положительный прогностический результат, что дает основание считать указанные методики универсальными и рекомендовать их для широкого внедрения в научно-исследовательский процесс материаловедческих лабораторий.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в "Перечень ВАК РФ":

- . Макаров А.Г., Ростовцева Н.Г., Литвинов А.М., Каланчук О.Э. Компьютерное прогнозирование вязкоупругих процессов полимерных материалов//Дизайн. Материалы. Технология, 2008, № 4 (7), с. 100 - 103.
- . Демидов А.В., Артемьева Е.Н., Каланчук О.Э. Определение энергии активации процессов релаксации и ползучести полимерных материалов//Известия вузов. Технология легкой промышленности, 2010, № 2, с. 39-43.
- . Макаров А.Г., Ростовцева Н.Г., Лебедева С.В., Каланчук О.Э. Моделирование нелинейно-наследственной ползучести геотекстильных нетканых материалов//Дизайн. Материалы. Технология, 2010, № 3 (14), с. 68 - 71.
- . Макаров А.Г., Каланчук О.Э., Пушкарь Д.В., Ростовцева Н.Г. Компьютерное моделирование и прогнозирование деформационных процессов парашютных тканей//Дизайн. Материалы. Технология, 2010, № 4 (15), с. 83 - 87.

Другие публикации:

- . Абрамова И.В., Артемьева Е.Н., Каланчук О.Э. Оптимизация выбора автоматической модели деформационных свойств полимерных материалов//Известия вузов. Технология легкой промышленности.- 2008.- № 1. с. 53-55.
- . Артемьева Е.Н., Каланчук О.Э., Лебедева С.В., Макаров А.Г. Автоматическое моделирование вязкоупругости полимерных материалов, применяемых в парашютостроении//Вестник СПГУТД. Серия 1: Естественные технические науки, 2010, №3, с. 67-71.
- . Абрамова И.В., Каланчук О.Э., Литвинов А.М., Федорова С.В. Прогнозирование обратной релаксации полимерных материалов//В кн.: Ежегодный симпозиум "Перспективные материалы и технологии", 25-29 мая 2009, Витебск, Республика Беларусь, с.218-221.
- . Каланчук О.Э., Лебедева С.В., Пушкарь Д.В. Разработка компьютерных методов анализа деформационных свойств полимеров и прогнозирования деформационных процессов//В кн.: V Международная конференция "Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений", 21-27 июня 2010, г. Тамбов, Россия, с. 127.
- . Ростовцева Н.Г., Литвинов А.М., Абрамова И.В., Каланчук О.Э. Расчет релаксационных процессов полимерных материалов. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2009611358.

2

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06.03.2009//Опубликован Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем, № 2009, с.321.

10. Ростовцева Н.Г., Литвинов А.М., Абрамова И.В., Каланчук О.Э. Расч характеристик ползучести полимерных материалов. Свидетельство официальной регистрации программы для ЭВМ № 20096113 Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06.03.2009//Опубликова Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем, № 2009, с.321.

11. Ростовцева Н.Г., Литвинов А.М., Абрамова И.В., Каланчук О.Э. Рас характеристик релаксации полимерных материалов. Свидетельство официальной регистрации программы для ЭВМ № 20096113 Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06.03.2009//Опубликова Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем, № 2009, с.321.

12. Ростовцева Н.Г., Литвинов А.М., Абрамова И.В., Каланчук О.Э. Рас процессов ползучести полимерных материалов. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2009611361. Зарегистрировано в Реес программ для ЭВМ 06.03.2009//Опубликовано: Программы для ЭВМ. Б данных. Топологии интегральных микросхем, № 2, 2009, с.322.

Подписано в печать 13.08.2010. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 0,9. Формат 60 × 84 1/16. Тираж 100 экз. Заказ № 86

Отпечатано в типографии СПГУТД

191028, Санкт-Петербург, ул. Моховая, д.26