

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**Учреждение образования
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

**МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА ПО ИЗУЧЕНИЮ КУРСА ДЛЯ МАГИСТРАНТОВ
СПЕЦИАЛЬНОСТИ 1-50 80 03 «ТЕХНОЛОГИЯ ОБУВНЫХ И КОЖЕВЕННО-
ГАЛАНТЕРЕЙНЫХ ИЗДЕЛИЙ»**

**Витебск
2014**

УДК 687.016.03:675.152

Современные методы исследования материалов: методическая разработка по изучению курса для магистрантов специальности 1-50 80 03 «Технология обувных и кожевенно-галантерейных изделий».

Витебск, Министерство образования Республики Беларусь, УО «ВГТУ», 2013.

Составитель: д.т.н., проф. Горбачик В.Е.

Методическая разработка предназначена для самостоятельной работы магистрантов.

Одобрено кафедрой конструирования и технологии изделий из кожи УО «ВГТУ» " 2 " _____ апреля _____ 2013 г., протокол № 10.

Рецензент: к.т.н., доц. Наурзбаева Н.Х.

Редактор: к.т.н., доц. Томашева Р.Н.

Рекомендовано к опубликованию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ»

« 4 » _____ декабря _____ 2013 г., протокол № 8.

Ответственный за выпуск: Чумак В.М.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»

Подписано к печати _____ Формат _____ Уч.-изд. л. _____

Печать ризографическая. Тираж _____ экз. Заказ № _____

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Лицензия № 02330/ 0494384 от 16 марта 2009 г.

210035, Витебск, Московский пр-т, 72.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Определение характеристик динамических свойств материалов методом вынужденных резонансных колебаний	5
1.1 Исследование деформации изгиба в динамическом резонансном режиме.....	5
1.1.1 Характеристики метода вынужденных резонансных изгибных колебаний.....	5
1.1.2 Методика проведения испытаний.....	8
1.2 Динамические резонансные испытания образцов, свернутых в виде кольца.....	10
1.2.1 Устройство для определения динамической жесткости образцов кож, свернутых в виде кольца.....	10
1.2.2 Результаты исследования динамической жесткости образцов кож, свернутых в виде кольца.....	11
1.3 Исследование жесткости в динамическом режиме сжатия	14
1.4 Инструментальный метод определения деформационных показателей волосяного покрова меха	21
2 Метод акустической эмиссии	25
2.1 Исследование закономерностей акустической эмиссии при деформации пористо-волоконистых биокomпозитов.....	25
2.2 Применение метода акустической эмиссии для определения предельных деформаций (метод контрольного эталона).....	28
3 Определение деформационных свойств материалов с помощью фрактальной размерности	30
4 Метод релаксационной спектрометрии	38
4.1 Графоаналитическая система моделирования свойств объекта методом релаксационной спектрометрии.....	38
4.2 Теоретические основы метода.....	41
4.3 Спектры времен релаксации.....	43
4.4 Датчик релаксационных характеристик.....	45
5 Исследование вязкоупругих свойств материалов при динамическом indentировании	49
Литература	54

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время производство товаров народного потребления остро нуждается в методах и устройствах неразрушающего контроля, которые позволили бы качественно анализировать структуру сырья, полуфабриката и кожи с целью изменять ее целенаправленными и рационально сочетаемыми химическими и механическими воздействиями. В современных условиях экономического развития предприятиям обувной промышленности необходимо совершенствовать качество выпускаемой продукции. Актуальной проблемой производства является осуществление контроля показателей упругих и пластических свойств без разрушения материалов и готовых конструкций, которые определяют качество изделий.

В связи с этим, остро стоит проблема с разработкой и применением более современных методов исследования материалов, которые бы могли не только исследовать материалы, заготовки и непосредственно саму обувь, не доводя их до разрушения, но и получать достоверные данные в результате проведенных исследований.

1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ВЫНУЖДЕННЫХ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ

1.1 Исследование деформации изгиба в динамическом резонансном режиме

1.1.1 Характеристики метода вынужденных резонансных изгибных колебаний

Материалы и изделия из них при изготовлении и эксплуатации подвержены в основном динамическому воздействию внешней механической силы. Поэтому стандартные методы испытания, позволяющие определять такую важную характеристику механических свойств кожи, резины и других материалов, как условный модуль упругости E_u , не дает представления о поведении материалов в динамических условиях из-за малых скоростей испытания, а найденные значения E_u не отражают реальных механических свойств при воздействии динамических сил. Для определения динамических свойств материалов применяют метод вынужденных резонансных изгибных колебаний.

Метод вынужденных резонансных изгибных колебаний относится к акустическим методам испытаний. Акустические методы подразделяют на метод свободных колебаний и метод вынужденных колебаний. Установлено, что для материалов легкой промышленности наиболее приемлем второй метод испытаний, который значительно упрощает методику регистрации колебаний проб материалов.

По частотному диапазону все колебания можно подразделить на инфразвуковые (менее 20 Гц), звуковые (20–20 000 Гц), ультразвуковые ($2 \cdot 10^4$ – 10^9 Гц) и гиперзвуковые (более 10^9 Гц) частоты.

В результате исследований определено, что материалы и изделия легкой промышленности при изготовлении и эксплуатации подвержены воздействию внешней механической силы в частотном диапазоне от 1 до 200 Гц. В то же время выявлено, что указанные материалы обладают высокой способностью поглощать упругие звуковые колебания, что приводит в ряде случаев к невозможности применения ультразвуковых методов испытаний. Поэтому для оп-

ределения динамических показателей свойств материалов при действии различных факторов окружающей среды в основном используют метод вынужденных резонансных колебаний. Данный метод позволяет охватить частотный диапазон от 1 до 10^3 Гц, в котором происходит эксплуатация материалов, и, следовательно, их механические свойства в реальных условиях.

Рассмотрим метод вынужденных резонансных изгибных колебаний консольно закрепленной пробы материала (рис. 1.2 а). Колебательное движение консольно закрепленной пробы с учетом того, что поперечные размеры малы по сравнению с его длиной и длиной изгибной поперечной звуковой волны, можно описать, используя принцип Даламбера-Лагранжа, уравнением вида

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial \tau^2} + E_1 k^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \eta k^2 \frac{\partial^5 y}{\partial x^4 \partial \tau} = 0, \quad (1.1)$$

где первый член уравнения представляет силы инерции, второй – упругость образца, третий – внутренние потери по модели Кельвина – Фойгта; m – масса рабочей части пробы; y – прогиб балки; x – продольная координата пробы; τ – время; E_1 – динамический модуль упругости; k – радиус инерции поперечного сечения пробы относительно нейтральной оси; η – динамический коэффициент вязкости.

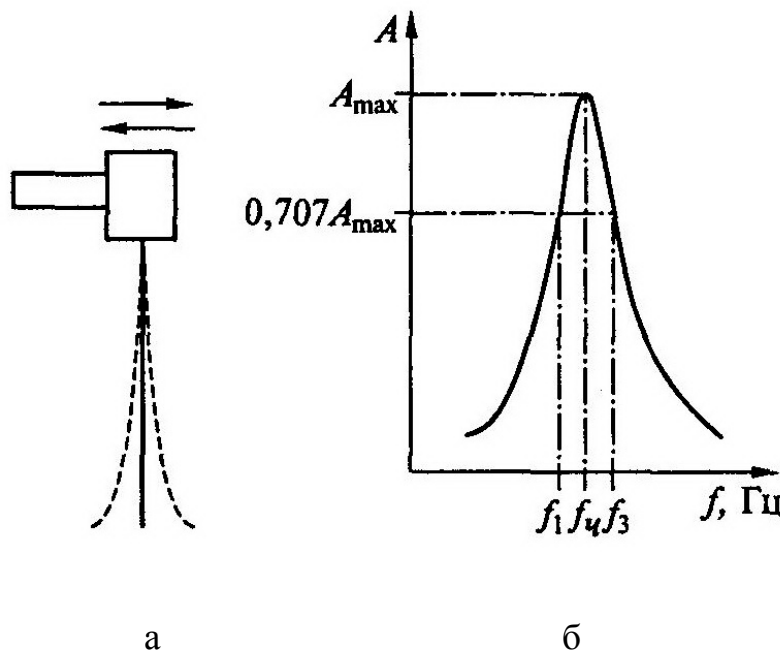


Рисунок 1.1 – Схема вынужденных резонансных изгибных колебаний:
 а – консольно-закрепленная проба материала; б – амплитудно-частотная характеристика пробы материала

Решение данного уравнения позволяет определить компоненты динамического комплексного модуля упругости образца E^* по формуле

$$E^* = E_1 + iE_2, \quad (1.2)$$

где i – мнимая единица; E_2 – динамический модуль вязких потерь, т. е. выделить динамические модули упругости E_1 и вязких потерь E_2 в материале за один цикл колебаний, чего не удастся осуществить при стандартных методах испытаний.

В свою очередь динамический модуль упругости E_1 определяют по формуле

$$E_1 = \frac{48\pi^2 l^4 \rho}{a_0^4 h^2} \left(f_r^2 + \frac{\Delta f^2}{8} \right), \quad (1.3)$$

а динамический модуль вязких потерь E_2 – по формуле

$$E_2 = \frac{48\pi^2 l^4 \rho}{a_0^4 h^2} f_r \Delta f, \quad (1.4)$$

где l – длина незакрепленной части пробы, м; ρ – плотность пробы, кг/м³; a_0 – коэффициент для первой гармоники ($a_0 = 1,875$); h – толщина пробы материала, м; f_r – резонансная частота, Гц; Δf – разность между двумя частотами f_2 и f_1 (Гц), амплитуда которых равна 0,707 максимальной (рис. 1.1 б).

Кроме компонентов E_1 и E_2 комплексного модуля упругости можно определить коэффициент (тангенс) механических потерь:

$$\operatorname{tg} \delta = E_2 / E_1. \quad (1.5)$$

Тангенс механических потерь характеризует рассеивание механической энергии в материале за один цикл колебаний.

Скорость v (м/с) распространения упругих колебаний в материале определяют по формуле

$$v = \sqrt{E_2 + p}, \quad (1.6)$$

а динамическую жесткость D ($\text{Н} \cdot \text{м}^2$) при изгибе – по формуле

$$D = E_1 I, \quad (1.7)$$

где I – момент инерции поперечного сечения пробы (м^4):

$$I = bh^3 / 12,$$

где b – ширина образца, м.

1.1.2 Методика проведения испытаний

Методика проведения акустических испытаний по методу вынужденных резонансных изгибных колебаний сводится к определению амплитудно-частотной характеристики испытываемой пробы материала (рис. 1.1 б), т. е. зависимости амплитуды A колебания образца от частоты f приложенной силы.

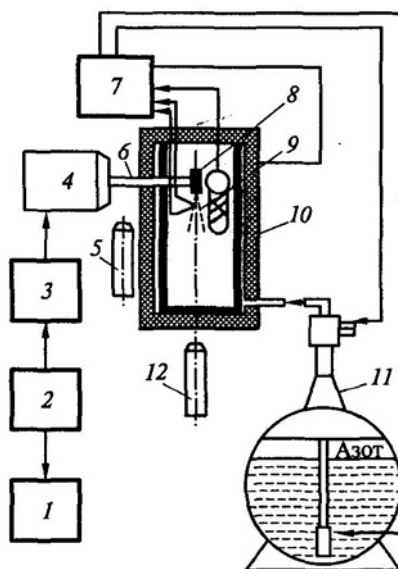


Рисунок 1.2 – Блок-схема установки для динамических испытаний:

- 1 – частотомер; 2 – генератор электрических сигналов; 3 – усилитель;
- 4 – генератор механических колебаний; 5, 12 – микроскопы;
- 6 – виброшток; 7 – автоматическая система регулирования;
- 8 – зажим; 9 – проба; 10 – криотермокамера; 11 – сосуд Дьюара

Установка МГУДТ позволяет проводить акустические испытания проб материалов при частоте от 1 до 500 Гц и температуре от 100 до +250 °С. Точ-

ность определения частоты и амплитуды колебания образца не менее 5 %.

Пробу 9 (рис. 1.2) исследуемого материала укрепляют в съемном зажиме 8, который вставляют в виброшток 6 генератора механических колебаний 4. Включают генератор электрических сигналов 2, частотомер 1 и усилитель 3. По истечении 10 мин установка может быть использована для испытаний. Для испытания при температуре большей или меньшей комнатной служит криотермокамера 10 и сосуд Дьюара 11 с жидким азотом. Регулировка температуры внутреннего объема криотермокамеры осуществляется регулятором температуры 7.

В начале опыта определяют резонансную частоту пробы 9. Для этого плавно вращают ручку «Частота» на генераторе 2 и следят за амплитудой конца колеблющейся пробы с помощью микроскопа 12. Когда амплитуда колебания пробы станет максимальной, наступает резонанс, т. е. вынужденная и собственная частоты колебания пробы совпадают. Отсчет резонансной f и других частот в опыте осуществляется по частотомеру 1. После определения резонансной частоты образца ручкой, расположенной на усилителе 3, устанавливают определенную амплитуду колебания виброштока 6. Амплитуду виброштока измеряют и регистрируют с помощью микроскопа 5. Амплитуда колебания виброштока должна составлять 0,1–1 мм. Следует помнить, что амплитуда колебаний виброштока при проведении опыта на любых частотах должна быть постоянной. После установления определенной амплитуды колебания виброштока измеряют амплитуду колебания конца пробы 9. Затем на генераторе 2 образцу задают частоты f_i , меньшие f_r , сначала с шагом в 2–3 Гц (два-три значения), а затем с шагом в 5–6 Гц (три-четыре значения) определяют амплитуду колебания образца. Аналогично измеряют амплитуды колебания образца на частотах, больших f_r . Интервал задания величин частот и их число берут те же. Найденные амплитуды колебания образца при соответствующих частотах заносят в табличную форму и по этим данным строят на миллиметровой бумаге амплитудно-частотную характеристику пробы материала (рис. 1.1 б).

При проведении испытаний при действии температур, меньших и больших 20 °С, соответствующая температура в криотермокамере задается, измеряется и регулируется автоматической системой регулирования 7 (АСР) температуры. Продолжительность термостатирования пробы материала при заданной температуре составляет 1–3 мин. Для испытаний берут образец материала квадратной формы размерами 5x5 или 10x10 см, из которого вырезают по три-пять образцов под углами 0, 45 и 90°.

1.2 Динамические резонансные испытания образцов кож, свернутых в виде кольца

1.2.1 Устройство для определения динамической жесткости образцов кож, свернутых в виде кольца

На рисунке 1.3 изображена блок-схема устройства для определения жесткости образцов кож, свернутых в виде кольца. Устройство состоит из металлического неподвижного основания 1, на подставке которого с помощью зажима 3 закреплен образец кожи 2 определенных размеров, свернутый в виде кольца. Два маленьких магнита 4 и 5 с помощью скобы 6 закреплены на верхней части вертикально расположенного кольца. В верхней части над магнитами 4 и 5 на некотором расстоянии от них расположена силовая катушка 7, соединенная с генератором 8 синусоидального напряжения, частота которого может изменяться с шагом 0,01 герца.

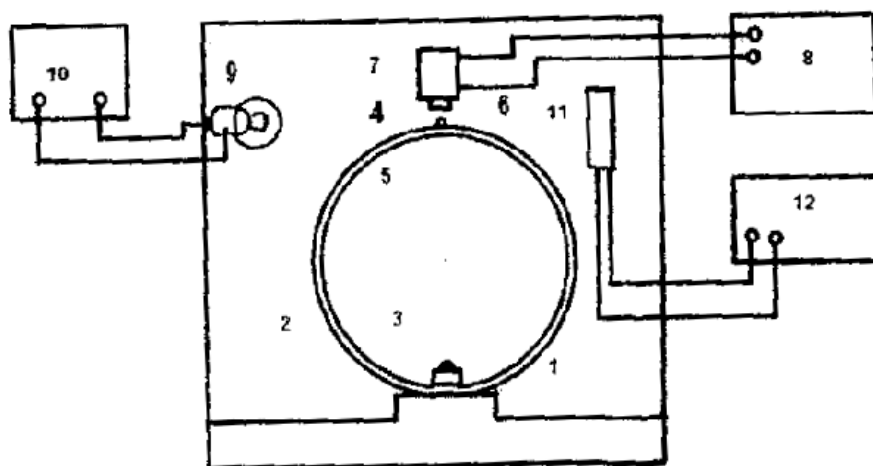


Рисунок 1.3 – Блок-схема устройства для определения динамической жесткости образцов кож, свернутых в виде кольца

Для регистрации деформации образца кожи 2 был использован фотоэлектрический датчик, состоящий из лампы накаливания 9, питаемой источником напряжения 10, и фотоэлемента 11, связанного с цифровым вольтметром 12. Нить лампы накаливания 9, верхний магнит 4 и геометрический центр фотоэлемента 11 расположены на одном уровне.

При включении генератора 8 в сеть, за счет взаимодействия магнитного поля, возникающего в силовой катушке 7 с магнитным полем магнитов 4 и 5, кольцевой образец кожи 2 совершает вынужденные колебания с частотой сигнала задающего генератора, которые вызывают деформацию образца кожи 2 в динамическом режиме. Амплитуда вынужденных колебаний системы образец-магниты регистрируется с помощью фотоэлектрического датчика и количественно оценивается по величине ЭДС фотоэлемента 11, измеряемой цифровым вольтметром 12. Изменяя частоту сигнала задающего генератора 8, добиваются наибольшей амплитуды колебаний кольцевого образца кожи 2, при этом фиксировалась частота ν_r , при которой возникает резонанс.

1.2.2 Результаты исследования динамической жесткости образцов кож, свернутых в виде кольца

Циклическая частота колебаний пластины, свернутой в виде кольца, представленная формулой, может быть выражена через $\omega_n = 2\pi \nu_{n.0}$, где $\nu_{n.0}$ мы будем обозначать частоту колебаний кольца в герцах, а индексом n – число продольных волн, возникающих по длине окружности кольца. Модуль жесткости такой системы $E = E_0^{(1)}$, выражается равенством

$$E_0^{(1)} = \frac{4\pi^2 \mu R^4}{N^2 I} \nu_{n.0}^2, \quad (1.8)$$

где
$$\frac{n(n^2 - 1)}{\sqrt{n^2 + 1}}. \quad (1.9)$$

Момент инерции сечения образца для случая консольно закрепленного образца определяется равенством $I = \frac{bh^3}{12}$ и масса единицы длины, свернутой в кольцо пластины, равна $\mu_l = pbh$, где b – ширина пластины, p – плотность материала пластины и h – ее толщина. Тогда, учитывая приведенные значения величин I , μ_l , h и полагая $\nu_{n.0} = \nu_{N.0}$, перепишем формулу (1.8) в виде:

$$E_0^{(1)} = \frac{437}{N^2} \frac{pR^4}{h^2} \nu_{n.0}^2. \quad (1.10)$$

Для проводимых нами измерений учитывались следующие параметры:

$$p = 7,5 \cdot 10^2 \text{ [кг} \cdot \text{м}^3\text{]}; \quad R = 2,55 \cdot 10^{-2} \text{ [м]}; \quad h = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ [м]}. \quad (1.11)$$

Из (1.10) и (1.11) получим

$$E_0^{(1)} = 1,04 \cdot 10^{-1} \frac{1}{N^2} v_{N,0}^2, \quad \text{[МПа]}. \quad (1.12)$$

Для консольно закрепленных образцов кожи длиной $l = 1,5 \cdot 10^{-2}$ [м] соответствующий модуль жесткости равен $E_k^{(1)} = 9,8 \cdot 10^{-4}$ [МПа]. Найдем отношение

$$E_k^{(1)} = 37 \frac{pl^4}{h^2} v_{N,0}^2. \quad (1.13)$$

В таблице 1.1 приведены значения величин $v_{N,0}$ и v_k для ряда избранных образцов кожи "полукожник эластичный" хромового дубления, условная жесткость D_j которой была предварительно определена на приборе ПЖУ-12М, а жесткость D_j^* тех же образцов кожи была определена в заводской лаборатории на аналогичном приборе. Кроме этого, в этой таблице представлены значения v_k^2 и $v_{N,0}^2$, а также их отношения.

Как видно, для всех случаев $v_k > v_{N,0}$, причем отношение $\frac{v_k^2}{v_{N,0}^2}$ сохраняет приближенное постоянство для образцов кожи с условной жесткостью D_j в пределах от $D_1=10$ до $D_5=50$. При этом проведенный расчет среднеквадратичного отклонения S отношений $\frac{v_k^2}{v_{N,0}^2}$ от среднего их значения $\frac{v_k}{v_{N,0}} = 3,6$ равен $S = 0,42$ при коэффициенте вариации $w = 11,6$ %. Эти расчеты показывают, что несмотря на различные значения условной жесткости D_j для всех исследуемых образцов кож можно принять $N = const$. Это постоянство позволяет воспользоваться формулой (1.13), определить значение N . Учитывая же, что модули $E_k^{(1)}$ жесткости консольно закрепленных образцов кожи и модули $E_{N,0}^{(1)}$ жесткости образцов кож, свернутых в виде кольца, относятся соответственно к одному и тому же образцу кожи и должны быть равны, в равенстве

(1.13) следует принять $E_k^{(1)} = E_{N,0}^{(1)}$.

Подставляя в равенство (1.13) отношение $\frac{v_k}{v_{N,0}} = 3,6$ и полагая в уравнении (1.9) значение $n = 2,6$, найдем

$$N = \sqrt{29,4} = 5,43 \cong \frac{n(n^2-1)}{\sqrt{(n^2+1)}} = \frac{2,6 \cdot 5,76}{\sqrt{7,76}} = 5,39, \quad (1.14)$$

т. е. значение $n = 2,6$ лежит между $n = 2$ и $n = 3$. Это значит, что число продольных волн, укладывающихся по длине окружности кольца, не равное целому числу, соответствует промежуточному режиму образования продольных волн.

Постоянство же значения N для различных по жесткости D_j различных образцов кож показывает, что такая комбинация образования продольных волн не может препятствовать возможности использования формулы (1.15) для определения модуля жесткости $E_0^{(1)}$.

$$E_k^{(1)} = \frac{4\pi^2 \mu \cdot l^4}{3,667} v_r^2. \quad (1.15)$$

Приняв $v_{N,0} = v_0$ для случая, когда модуль жесткости E_0 определяется формулой (1.12), с учетом формулы (1.14), значение модуля жесткости E_0 выразится равенством

$$E_0 = 3,54 \cdot 10^{-3} v_0^2 \text{ [МПа]}. \quad (1.16)$$

Если момент инерции сечения образца кожи будет $I = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ [м}^4\text{]}$, жесткость образца кожи, свернутого в виде кольца, окажется равной

$$D_0 = E_0 I = 1 \cdot 10^{-2} v_0^2 \text{ [Нм}^2\text{]}. \quad (1.17)$$

Далее представляет особый интерес парный выборочный коэффициент корреляции r между значениями величины условной жесткости D_j , представленными в таблице 1.1, и значениями $v_{N,0}^2$, а также построение соответствующего уравнения линейной регрессии.

Результаты расчета полученных по этой формуле данных представлены в виде прямой линии, изображенной на рисунке 1.4.

Сравнение наклонных прямых (рис. 1.4 а, б) свидетельствует о заметном влиянии значений условной жесткости D_j и D_j^* , на расчеты, проводимые с помощью уравнения линейной регрессии. Постоянство же отношений $\frac{v_k^2}{v_{N.0}^2}$ при различных значениях D_j и D_j^* показывает, что методика определения модулей жесткости $E_0^{(1)}$ с помощью формулы (1.10) является более надежной по сравнению с методикой определения жесткости на приборе ПЖУ-12М.

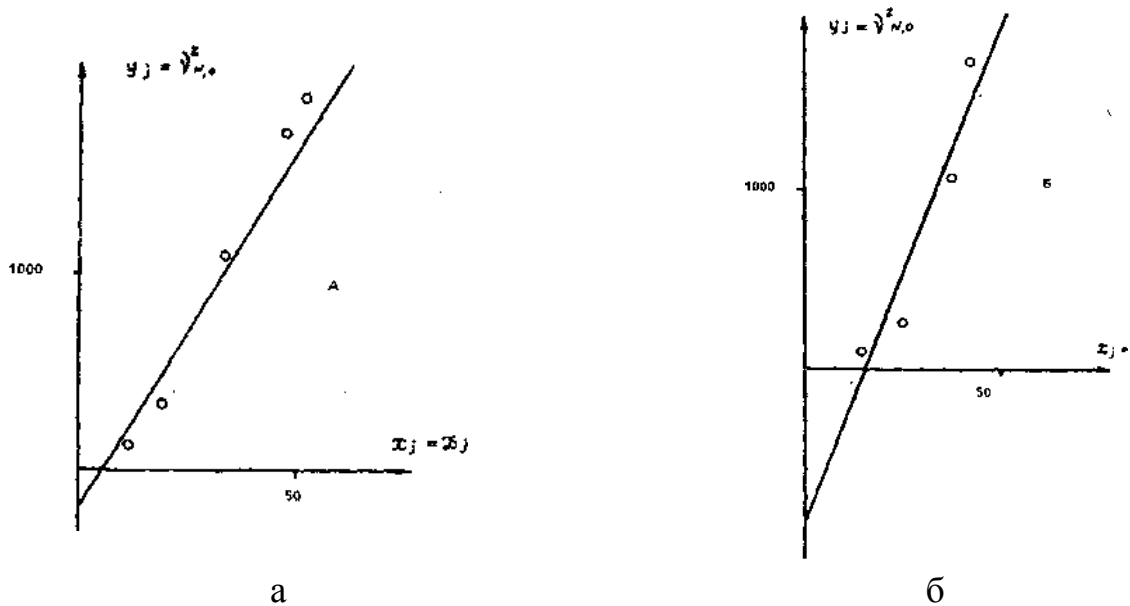


Рисунок 1.4 – Графическое изображение уравнений линейной регрессии, соответствующих значениям условной жесткости D_j (а) и D_j^* (б) образцов кож, свернутых в виде кольца, в зависимости от квадрата резонансной частоты $v_{N.0}^2$

1.3 Исследование жесткости в динамическом режиме сжатия

Метод определения жесткости в динамическом режиме на сжатие [3] предусматривает определение механических свойств материала путём приложения к их лицевой части малой синусоидально изменяющейся нагрузки и регистрации ответного отклика со стороны исследуемого материала.

Выявлено, что при некоторых значениях частоты силового воздействия индектора на материал наступает резонанс. При этом исследуемый образец

становится практически упругой системой, а деформация кожи носит обратимый характер, что позволяет определить по зафиксированным значениям резонансной частоты силового воздействия жесткость исследуемого материала. Чем жестче структура материала, тем выше резонансная частота системы. Таким образом, используя вибродатчик, можно количественно оценить жесткость материала. Вибродатчик изображен на рисунке 1.5.

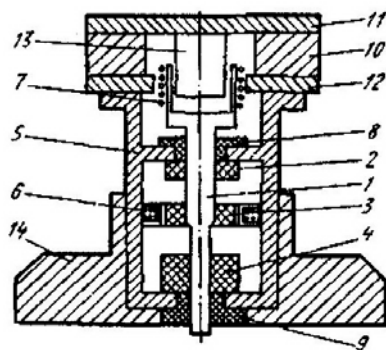


Рисунок 1.5 – Конструкция датчика с магнитным подвесом подвижного штока

Вибродатчик состоит из подвижного штока 1, выполненного из алюминиевого сплава, общая масса которого составляет несколько граммов. Выбор незначительной массы подвижного элемента дает возможность расширить динамический диапазон вибродатчика. Подвеску подвижного элемента вибродатчика осуществляют с помощью кольцевых ферритовых магнитов 2, причем магнит 3 зафиксирован непосредственно на штоке 1 вибродатчика и размещен между двумя соосно расположенными магнитами 2 и 4, прикрепленными к корпусу самого вибродатчика.

Плоскости магнитов 2-4 параллельны. Их магнитные поля имеют противоположные направления относительно друг друга. Поэтому подвижный шток вибродатчика находится во взвешенном состоянии за счет силового воздействия магнитных полей магнитов 2-4. Такая компоновка магнитов позволяет использовать магнит 3 в качестве сердечника измерительной катушки 6, конструктивно размещенной в корпусе 5 вибродатчика таким образом, что плоскость витков измерительной катушки 6 совпадает с плоскостью магнита 3.

Для создания гармонических колебаний штока 1 в его верхней части расположена силовая катушка 7. Сам шток 1 размещен в центре цилиндриче-

ского корпуса 5 в направляющих втулках 8 и 9, выполненных из антифрикционного материала. Кроме того, имеется кольцевой ферритовый магнит 10, размещенный между двумя стальными пластинами 11 и 12 круглой формы. В центре пластины 11 крепится стальной сердечник 13. Магнитную цепь замыкает нижняя пластина 12 с отверстием в центре, через которое проходит нижняя часть сердечника цилиндрической формы 13. В зазоре между сердечником 13 и отверстием пластины 12 установлена силовая катушка 7.

В центре стального основания 14 расположено отверстие, в котором зафиксирован корпус 5 вибродатчика. Отверстие стального основания служит для выхода нижней контактной поверхности подвижного штока 1. Для измерения жесткости кожи описанный выше вибродатчик помещают на выбранную кожу или образец.

После подачи на силовую катушку вибродатчика синусоидального напряжения, вырабатываемого генератором стандартных сигналов, в силовой катушке вибродатчика возникает переменное магнитное поле, взаимодействующее с магнитным полем постоянного магнита.

Таким образом, силовая катушка вместе с подвижным штоком вибродатчика совершает вынужденные колебания с частотой, равной частоте напряжения задающего генератора. При этом в измерительной катушке вибродатчика наводится ЭДС индукции, величина которой пропорциональна амплитуде колебаний подвижного штока вибродатчика. Значение ЭДС на измерительной части вибродатчика визуально оперативно отмечается на экране осциллографа, выполняющего роль индикатора резонанса, амплитудное резонансное значение ЭДС фиксируется цифровым вольтметром.

При ступенчатом изменении частота сигналов задающего генератора от 1 Гц в сторону увеличения частоты происходит увеличение амплитудного значения ЭДС на измерительной катушке. В проведенных авторами экспериментах (на частоте 15 Гц) ЭДС на измерительной катушке имела максимальное значение. Дальнейшее повышение частоты сигнала задающего генератора ведет к снижению ЭДС. Таким образом, вибродатчик представляет собой колебательную систему, имеющую собственную резонансную частоту, равную 15 Гц.

При нагружении вибродатчика на исследуемый материал резонансная частота системы изменяется в зависимости от структуры исследуемого материала. Так, чем жестче его структура, тем выше резонансная частота системы. Таким образом, используя вибродатчик, можно количественно оценить жест-

кость исследуемого материала.

Для оценки воспроизводимости результатов измерений резонансных частот каждый образец кожи испытывали в десяти произвольно выбранных точках. Резонансную частоту определяли по максимальному значению ЭДС, наводимой в измерительной катушке вибродатчика. В результате были получены значения резонансной частоты для разных видов кож: кожи хромового дубления для верха обуви – 50 ± 5 Гц (полукожник) и 72 ± 7 Гц (яловка), кожи для низа обуви ниточного метода крепления циркониевого дубления – 110 ± 10 Гц. Анализируя полученные данные, в работе [3] был сделан вывод, что значение резонансной частоты является характерным количественным показателем деформационных свойств исследуемых образцов кож в динамическом резонансном режиме на сжатие.

В работе [2] было проведено исследование по нахождению закономерностей между динамическими показателями и характеристиками деформации сжатия кож с помощью вибродатчика.

Упруго-вязкие свойства исследуемых кож определялись по характеру деформации кожи, регистрируемой измерительной частью вибродатчика в виде амплитудно-частотных характеристик. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) (на рисунке 1.6 отмечена знаком 0) соответствует случаю свободных резонансных колебаний с частотой ν_0 подвижного штока вибродатчика. На том же рисунке показаны пример реакции кожи на воздействие подвижного штока вибродатчика в виде семейства амплитудно-частотных характеристик для различных исходных положений вибродатчика относительно лицевой поверхности исследуемого образца кожи — чепрака подошвенного ниточного циркониевого дубления. При этом АЧХ, отмеченная цифрой 4, соответствует положению вибродатчика, расположенного на поверхности исследуемых кож, когда подвижной шток вибродатчика в области контакта с кожей оказывает максимальное давление.

После снятия АЧХ, обозначенной цифрой 4, вибродатчик поднимался на 1 мм относительно поверхности исследуемой кожи и снималась АЧХ, обозначенная цифрой 3. Изменяя подобным образом положение вибродатчика относительно поверхности исследуемой кожи и фиксировались эти положения по нониусу штангенциркуля с шагом подъема 1 мм, получали АЧХ, обозначенные цифрами 2 и 1. Из рисунка 1.6 видно, что при принятом ступенчатом изменении положения вибродатчика относительно поверхности исследуемой кожи макси-

мумы амплитуд АЧХ соответствуют различным частотам ν_i , причем эти максимумы уменьшаются с увеличением значений резонансной частоты по определенному закону.

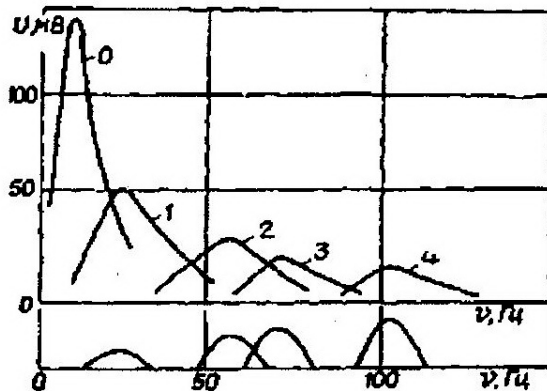


Рисунок 1.6 – АЧХ вибродатчика в свободном состоянии

Ниже оси абсцисс (рис. 1.6) приведены огибающие осциллограмм для описанных выше положений вибродатчика, снятых с помощью пьезодатчика и осциллографа, по площади которых можно приближенно оценить величину интегрального давления подвижного штока вибродатчика на исследуемую кожу. Было отмечено, что наибольшее интегральное давление на кожу соответствует резонансной частоте ν_4 , а наименьшее – ν_1 .

В таблице 1.1 приведены численные значения собственной резонансной частоты ν_i , свободного и нагруженного на исследуемую кожу вибродатчика и приведена величина амплитуды колебаний свободного подвижного штока вибродатчика, условно приравненная единице $z_m = 1$.

Таблица 1.1 – Резонансные характеристики различных видов кож

Вид кожи	Резонансные показатели											
	ν_i	z_m	$z_m \nu_i$	$x_{mi} * 1$	U	I	$\cos \varphi$	$P * 10^3$	$P_r * 10^3$	$P_i * 10^3$	ψ_i	Ki
Вибродатчик	15	1,00	15	1,80	0,173	0,011	0,69	1,36	0,12	1,24	-	73
Полукожник	40	0,66	27	1,19	0,158	0,044	0,86	6,00	1,84	3,16	11,5	529
Яловка	68	0,42	28	0,76	0,152	0,046	0,90	6,27	2,00	4,27	23,5	1514
Велюр	71	0,37	26	0,67	0,148	0,044	0,90	5,83	1,84	3,99	25,0	1650
Чепрак подошвенный	151	0,27	41	0,49	0,142	0,050	0,96	6,82	2,40	4,47	48,0	7355

Следует обратить внимание на произведение $z_m * \nu_i$, которое изменяется

для указанных образцов кожи в пределах 21-41, т. е. имеет среднюю величину, равную 30,5, что соответствует выходу подвижного штока вибродатчика относительно основания на величину 1,5 мм. Мы считаем, что постоянство произведения $z_m \cdot v$, должно соблюдаться при испытании различных кож, что дает возможность сопоставления проводимых с различными кожами измерений и позволит использовать другие аналогичные вибродатчики.

На рисунке 1.7 приведены кривые АЧХ, которые соответствуют полужокожу хромтаннидного дубления (1), велюру хромового дубления (2), выростку лицевому хромового дубления (3), чепраку подошвенному ниточному циркониевого дубления (4). При снятии АЧХ этих кож подвижной шток вибродатчика имел выход 1,5 мм, оказывая одинаковое статическое давление на исследуемые кожи. При анализе кривых АЧХ наблюдается изменение резонансной частоты в зависимости от жесткости исследуемой кожи.

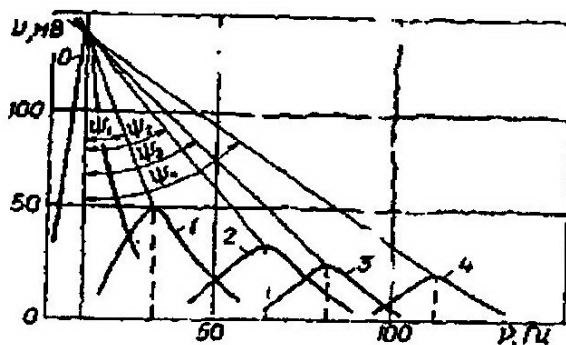


Рисунок 1.7 – АЧХ свободного и нагруженного вибродатчика на различные кожи

На рисунке 1.7 вершины кривых АЧХ различных кож соединены с вершиной кривой АЧХ, полученной при свободно колеблющемся подвижном штоке вибродатчика. При продолжении эти прямые пересекают ось ординат под различными углами ψ_i . При этом угол ψ_1 для мягкой кожи меньше угла ψ_2 для более жесткой кожи, которая в свою очередь меньше угла ψ_3 для еще более жесткой кожи и т. д., т. е.

$$\psi_4 > \psi_3 > \psi_2 > \psi_1.$$

Таким образом, для оценки упругих свойств кожи на сжатие в динамическом режиме был введен угол ψ_i , который был назван углом динамической

жесткости кож.

Следует также отметить, что амплитуда реального отклонения подвижного штока вибродатчика от положения равновесия на резонансной частоте ν_0 составляла $x_{m0} = 1,8$ мм. Зная величину x_{m0} , с учетом значения z_m в линейном приближении можно рассчитать реальные амплитуды x_{mi} колебаний исследуемых кож, совершаемых под воздействием колебаний подвижного штока вибродатчика.

Получены показатели измерений, позволяющие определять энергетические характеристики затрат энергии при динамическом сжатии исследуемых кож. Для этого последовательно к силовой части вибродатчика включался резистор r и к этой цепи подводилось напряжение синусоидальной формы, снимаемое с выхода генератора стандартных сигналов. Изменялось действующее значение напряжения U на концах указанной последовательной цепи, а также напряжение на резисторе U_r . По величине падения напряжения на резисторе определялось действующее значение тока I , проходящего по указанной цепи. Кроме того, осциллографическим методом определялся сдвиг фаз между током I и напряжением U и рассчитывался косинус угла φ . Общая электрическая мощность определялась равенством $P = UI \cos \varphi$ мощность P_1 , расходуемая на создание движущей силы подвижного штока вибродатчика, с учетом мощности P_r , рассеиваемой на резисторе, т. е. $P_1 = P - P_r$.

Было установлено, что рост величины P_1 соответствует росту величины угла динамической жесткости исследуемых кож ψ . Принимая подвижную систему вибродатчика как линейный осциллятор, был рассчитан и коэффициент упругости подвеса подвижного штока вибродатчика по формуле:

$$K_0 = m\omega_0^2. \quad (1.18)$$

Суммарная упругость системы вибродатчик – исследуемая кожа рассчитывалась по формуле:

$$K_i = m\omega_i^2, \quad (1.19)$$

где m – масса подвижного штока вибродатчика, равная для данной конструкции вибродатчика $8,3 \cdot 10^{-3}$ кг; i – номер резонансных кривых отмеченных на рисунке 1.7.

Было установлено, что при взаимодействии подвижного штока вибро-

датчика с исследуемой кожей коэффициент динамической упругости K_i возрастает соответственно с увеличением частоты ν_i , ростом мощности P_1 и углом динамической жесткости кож ψ .

Таким образом, в результате проведенного исследования была найдена взаимосвязь вязкоупругих характеристик кож при сжатии в зависимости от частоты силового воздействия. При этом для оценки упругих свойств кожи в динамическом режиме было введено понятие угла динамической жесткости кож при сжатии.

1.4 Инструментальный метод определения деформационных показателей волосяного покрова меха

Показателями, определяющими время и удобство эксплуатации, теплозащитную способность и эстетический вид меховых изделий, являются вязкоупругие свойства меха. Существующие нормативно-технические нормы стандартизации меховых изделий не предусматривают объективных методов определения и оценки показателей упругих и пластических свойств меха. Применяющиеся в исследованиях различные методы определения упругости волосяного покрова меха исключают возможность сохранения результатов испытаний, что является серьёзным препятствием решения вопросов, связанных с улучшением технологии меха. Устройство, предложенное в работах [3], обладает рядом недостатков, характеризуется значительной продолжительностью проводимых испытаний, недостаточной точностью и достоверностью измерений.

На кафедре физики МГУДТ разработано и апробировано устройство для определения деформационных показателей волосяного покрова меха, которое исключает все вышеперечисленные недостатки.

Блок-схема устройства представлена на рисунке 1.8.

На массивном металлическом основании (1) размещается исследуемый образец меха (2). На волосяную поверхность образца меха устанавливается платформа (3), выполненная из органического стекла, к которой на верхней I плоскости закреплён лёгкий ферритовый магнит (4). Выше постоянного магнита (4) размещена силовая катушка (5), которая содержит ферритовый сердечник с обмоткой. Силовая катушка (5) подключена к генератору стандартных сигнала-

лов (6), частота которого изменяется с дискретностью 0,01 Гц в диапазоне от 0 до 100 Гц. В качестве регистрирующего устройства амплитуды колебаний в динамическом режиме использовался микроскоп МИ-1.

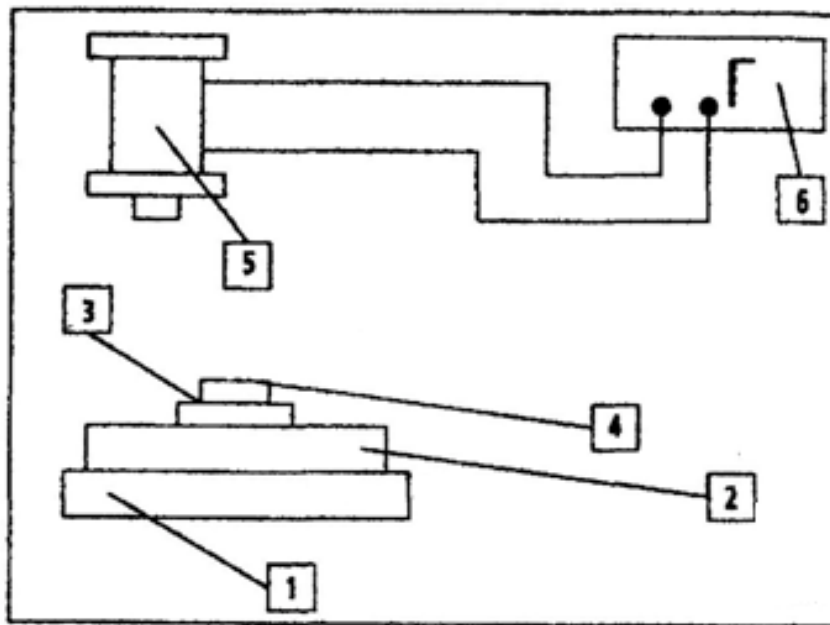


Рисунок 1.8 – Блок-схема устройства для определения деформационных показателей волосяного покрова меха

При включении генератора синусоидальных сигналов (6) по силовой катушке (5) протекает переменный ток. При этом в торцевой части катушки (5), обращенной к плоскости постоянного магнита (4), возникает переменное магнитное поле, направление которого изменяется в полном соответствии с частотой сигнала задающего генератора. Образец меха (2) вместе с платформой (3) и постоянным магнитом (4) представляют собой колебательную систему с определенной собственной резонансной частотой ν_0 системы. Таким образом, за счет взаимодействия переменного магнитного поля со стороны силовой катушки и магнитного поля постоянного магнита будет возникать гармонически изменяющиеся переменные по направлению силовые воздействия. При изменении частоты сигнала задающего генератора от 0 в сторону увеличения частоты сигнала наблюдалось увеличение амплитуды деформации. При приближении частоты сигнала к собственной частоте механической системы мех-платформа-

магнит амплитуда деформации достигла максимального значения. При дальнейшем увеличении частоты сигнала генератора амплитуда деформации монотонно убывала.

С целью сравнения органолептического и инструментального резонансного методов оценки деформационных свойств волосяного покрова были выбраны 6 образцов меха различной жесткости. С помощью устройства снимались амплитудно-частотные характеристики 6 образцов волосяного покрова меха различной жесткости, которые представлены на рисунке 1.9, а их параметры – в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Параметры АЧХ образцов меха

Образец № 1. Волосяной покров шкурки морского тюленя												
N, Гц	10	15	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
X, мм	0,32	0,43	0,91	1,0	1,1	0,85	0,69	0,65	0,52	0,47	0,40	0,35
Образец № 2. Волосяной покров меховой полугрубой овчины												
v, Гц	17	18	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
X, мм	0,13	0,14	0,18	0,19	0,21	0,23	0,23	0,2	0,19	0,17	0,15	
Образец № 3. Волосяной покров грубошерстной овчины												
v, Гц	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
X, мм	0,49	0,5	0,55	0,65	1,07	1,35	1,40	1,29	1,15	1,00	0,87	0,75
Образец № 4. Волосяной покров шкурок кролика												
v, Гц	9	10	11	12	13	14	15	-	-	-	-	-
X, мм	0,09	0,10	0,12	0,16	0,16	0,13	0,12	-	-	-	-	-
Образец № 5. Волосяной покров шубной овчины												
N, Гц	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	-
X, мм	0,32	0,45	0,51	0,55	0,58	0,55	0,48	0,37	0,35	0,2	0,17	-
Образец № 6. Волосяной покров яловки легкой												
v, Гц	22	25	26	27	29	30	31	32	33	34	35	36
X, мм	0,27	0,34	0,39	0,42	0,43	0,52	0,85	0,80	0,75	0,69	0,67	0,61

В соответствии с разработанной теорией определения деформационных показателей вязкоупругих материалов в динамическом резонансном режиме [4] был определен спектр деформационных показателей, к которым относятся: K – коэффициент упругости, b – коэффициент вязкого трения, $\operatorname{tg}\delta$ – тангенс угла механических потерь, E' – модуль упругости, E'' – модуль гистерезисных потерь, Q – добротность меха, которая определяет сочетание упругих и пластических свойств меха, τ – время релаксации напряжения. Рассчитанные данные деформационных показателей для 6 образцов меха представлены в таблице 1.3.

Между деформационными показателями по оценке жесткости, упругости, способности меха к сволачиваемости, полученными инструментальным и органолептическим методами, существует корреляция.

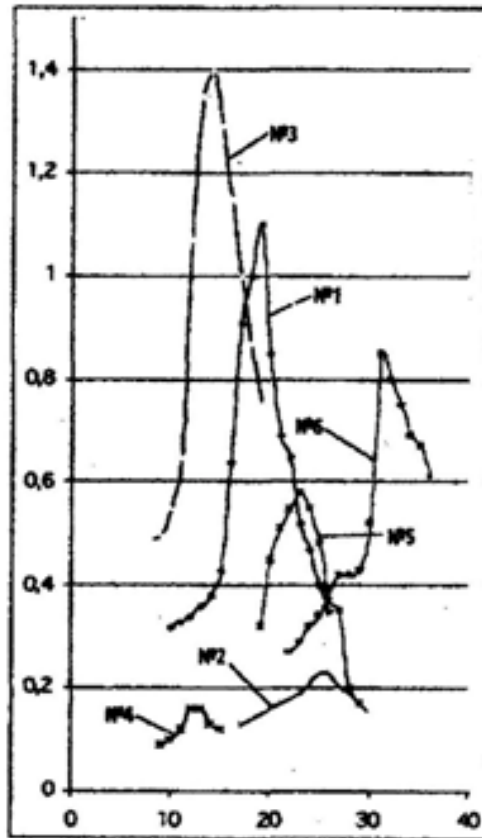


Рисунок 1.9 – Амплитудно-частотные характеристики образцов волосяного покрова меха различной жесткости

Таблица 1.3 – Деформационные показатели образцов меха

Образец	Врез, Гц	К, Н/м	b, кг/с	tgδ	E', Па	E'', Па	Q	τ, с
Шкурка морского	19	71,12	0,149	0,25	71,12	17,78	4,0	0,067
Овчина меховая полугрубая	25	100,94	0,194	0,30	101,53	30,46	3,3	0,042
Овчина грубошерстная	14	38,61	0,171	0,39	38,54	15,03	2,6	0,058
Кролик	13	30,76	0,115	0,32	29,31	9,38	3,1	0,080
Овчина шубная	23	80,64	0,138	0,24	33,04	19,93	4,1	0,059
Яловка легкая (КРС)	31	185,5	0,190	0,20	184,95	36,99	5,1	0,052

Из данных таблицы 1.3 наибольшей упругостью и меньшей способностью к сволачиванию обладает мех яловки легкой (КРС). Наименьшей упругостью и наибольшей способностью к сволачиванию обладает мех кролика.

Использование устройства и разработанной теории позволяют определять изменение упругих и пластических свойств меха в процессе технологической обработки, под воздействием влаги, теплового поля и других видов физических воздействий.

2 МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

2.1 Исследование закономерностей акустической эмиссии при деформации пористо-волоконистых биокompозитов

Исследование поведения биологических композиционных сред в рамках постулатов и методов механики сплошных сред остается в настоящее время актуальной проблемой [5]. Наличие в этих материалах областей с резко различающимися свойствами и границ раздела приводит к появлению особенностей деформационного поведения, не встречающихся в гомогенных твердых телах. Выявление этих особенностей необходимо для понимания фундаментальной закономерности поведения структурно-неоднородных сред, так и разработки новых композиционных материалов заранее заданными свойствами. Одним из перспективных методов исследования в экспериментальном материаловедении является метод акустической эмиссии (АЭ), позволяющий регистрировать акустическое излучение, возникающее в ходе перестройки структуры твердого тела при внешних механических воздействиях. В настоящей работе исследованы закономерности акустической эмиссии при пластической деформации и разрушении биокompозитов. В качестве последних использовались образцы кожаной ткани, имеющие пористо-волоконистую структуру и являющиеся своеобразным предельным случаем строением биокompозиционных материалов [5].

Для изучения особенностей акустической эмиссии использовали оригинальную установку (рисунок 2.1), разработанную в ИГД СО РАН. На установке можно проводить испытания на одноосное нагружение образцов с фиксированной скоростью деформирования. Регистрацию акустической эмиссии проводили датчиком КД 91 обеспечивающим частоту приема сигнала в диапазоне $50 < f$

< 200 кГц. Регистрируемыми параметрами акустической эмиссии являлся суммарный счет N , скорость счета АЭ – N , амплитуда АЭ – A , энергия сигнала (импульса) АЭ – E .

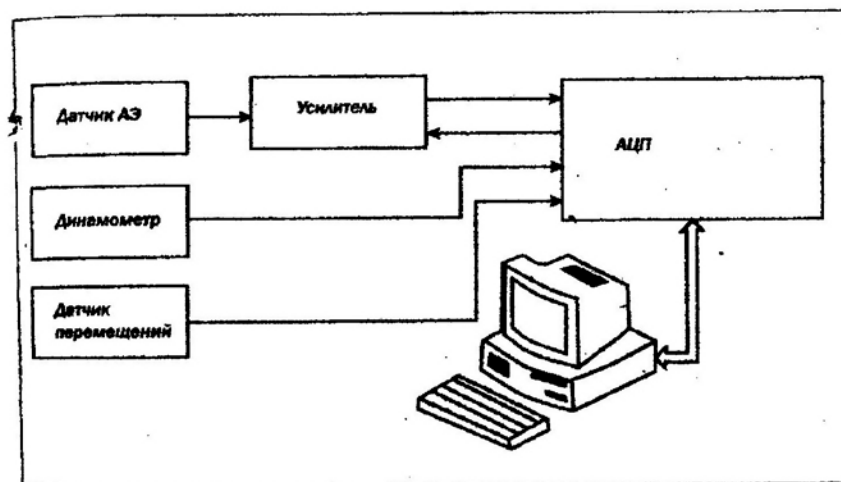


Рисунок 2.1 – Функциональная схема автоматизированного стенда

Образцы изготавливали в виде двухсторонней лопатки с длиной базовой части 50 мм в направлении преимущественной ориентации волокон. Испытания проводили при комнатной температуре. Уровень дискриминации задавался в соответствии с измеренными шумовыми характеристиками экспериментальной установки.

Одновременно с изменением характеристик акустической эмиссии определяли кривые напряжение – деформация (σ - ϵ) образцов, при скорости деформации, равной $0,0083 \text{ с}^{-1}$. Во время испытания, через интервал времени, равный 0,5 м/с, синхронно регистрировали параметры деформирования и количество импульсов, поступавших на акустический датчик. Сбор, обработку и анализ экспериментальных данных проводили с помощью ЭВМ.

На рисунке 2.2 приведены характерные зависимости параметров акустической эмиссии и σ от величины деформации ϵ .

График (σ - ϵ) имеет направление выпуклости вниз, что характерно для материалов с сетчатой структурой. Монотонное увеличение скорости счета на графике указывает на высокую пористость материала.

Из графиков видно, что при увеличении деформации свыше 30 % ($\epsilon > 0,3$) происходит резкое изменение наклона кривых суммарного счета, энергии и

увеличение активности АЭ, что указывает на смену механизма разрушения. Это может быть связано с образованием открытой пористости из-за интенсивного разрыва волокон структуры.

Таким образом, проведенное исследование позволило установить особенности акустической эмиссии при деформировании пористо-волокнистых биокomпозитов.

Характеристики акустической эмиссии правильно передают развитие пластической деформации и начальной стадии разрушения. Применение метода акустической эмиссии может оказаться эффективным при диагностике пористо-волокнистых биокomпозитов.

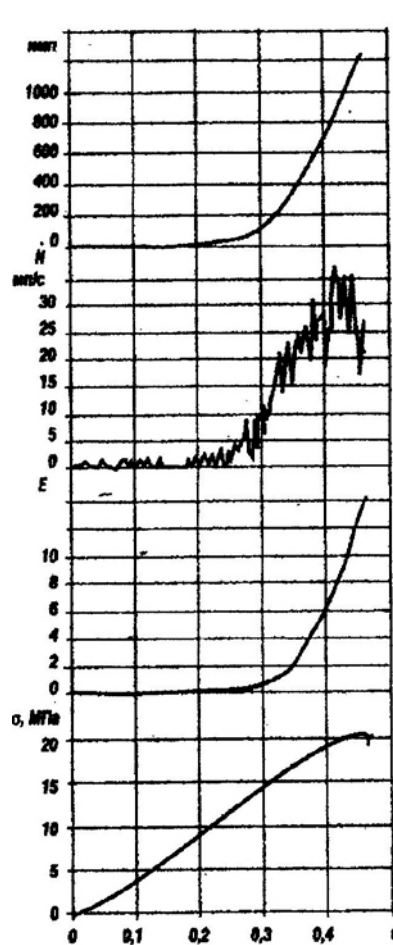


Рисунок 2.2 – Параметры зависимости акустической эмиссии от величины деформации пористо-волокнистого биокomпозита

2.2 Применение метода акустической эмиссии для определения предельных деформаций (метод контрольного эталона)

В биополимерных системах механическое поведение в основном определяется вязкоупругими и пластическими свойствами. С помощью измерений этих свойств могут быть получены сведения о природе и скоростях перераспределения конформаций, а также о расположении и взаимодействии микромолекул в полипептидных цепях.

Изменения, происходящие в коже при ее обработке, влияют, прежде всего, на подвижность структурных элементов дермы. Единственным элементом кожной ткани, которая сохраняется в полуфабрикate на всех стадиях обработки и в несколько измененном виде составляет основу кожной ткани в готовом виде, является коллаген. Структура кожной ткани определяется преимущественно строением этого белка, направлением и густотой переплетения волокон [6]. При механических (силовых) воздействиях на кожную ткань происходит ее деформация, то есть ее волокнистая многоступенчатая структура переходит из состояния равновесия в «возбужденное» состояние. При взаимном перемещении, разрыве элементарных связей, возникновении и развитии микротрещин высвобождается энергия, которая частично переходит в звуковое излучение – акустическую эмиссию (АЭ).

Для определения предельных деформаций кожной ткани в работе предложен метод контрольного эталона, основанный на регистрации, последующей обработке параметров акустических сигналов ультразвукового диапазона при деформировании и разрушении эталонного образца. Прочность контрольных образцов определяется по значениям параметров акустической эмиссии при их деформациях в пределах 50-70 % от предельной деформации эталона.

Метод реализуется на специально разработанной установке в процессе активного нагружения контролируемого объекта.

Регистрация сигналов акустической эмиссии осуществлялась с помощью специального датчика. Наличие датчика перемещений и акустической эмиссии позволяет определять различные показатели акустической эмиссии в зависимости от времени процесса, деформаций и напряжений, возникающих в образце. Определение предельных деформаций в образце проводили при одноосном испытании (таблица 2.1). Для связи показателей акустической эмиссии (N-) и величины деформации используем распределение Седракяна:

$$\frac{N}{N_{\varepsilon}} = 1 - \left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_k} \right)^m \right]^{\gamma},$$

где N – текущая накопленная интегральная сумма импульсов АЭ; N_{ε} – максимальная интегральная сумма импульсов АЭ, достигаемая при разрушении; ε – текущая деформация образца; ε_k – предельная деформация, после которой наступает разрушение образца; m и γ – параметры распределения.

Таблица 2.1 – Одноосное деформирование, опыты на разрыв при скорости деформирования 50 мм/мин (продольные образцы)

№ партии	Средняя толщина, мм	Образец	$\varepsilon_{\text{пред. эксп}}$	30 % от $\varepsilon_{\text{пред.}}$		50 % от $\varepsilon_{\text{пред.}}$		70 % от $\varepsilon_{\text{пред.}}$	
				$\varepsilon_{\text{пред.}}$	$\Delta_{\text{отн, \%}}$	$\varepsilon_{\text{пред.}}$	$\Delta_{\text{отн, \%}}$	$\varepsilon_{\text{пред.}}$	$\Delta_{\text{отн, \%}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2,07	1	0,116	0,043	62,765	0,05	56,407	0,105	9,156
		2	0,142	0,302	112,865	0,1	29,142	0,133	6,233
		3	0,142	0,268	88,846	0,137	3,19	0,149	5,524
		4	0,148	0,164	10,299	0,398	168,26	0,395	166,35
		5	Эталон						
2	1	1	0,209	0,506	141,795	0,506	141,79	0,107	49,023
		2	0,225	0,344	52,832	0,189	16,212	0,189	16,212
		3	Эталон						
3	1,03	1	0,201	0,128	36,205	0,128	36,205	0,226	12,692
		2	0,204	0,066	67,508	0,066	67,508	0,153	25,123
		3	0,184	0,169	8,055	0,143	22,437	0,527	186,04
		4	0,178	0,068	61,87	0,147	17,021	0,274	54,474
		5	Эталон						
4	1,33	1	Эталон						
		2	0,152	0,528	248,021	0,228	50,344	0,146	3,469
		3	0,137	0,381	148,501	0,235	72,287	0,144	5,371
		4	0,146	0,296	103,11	0,32	119,30	0,148	1,69
		5	0,168	0,389	131,361	0,391	132,02	0,313	85,707
		6	0,146	0,786	438,864	0,46	215,69	0,246	68,729
		7	0,146	0,253	73,223	0,302	107,00	0,212	45,172

Если при испытании однотипных образцов кожи интегральная сумма импульсов АЭ является величиной постоянной, то по данным акустических испытаний эталонного образца, нагружаемого до предельной деформации, определяются параметры распределения m и γ , предельная сумма амплитуд и деформация. Испытание проводят до разрушения эталонного образца.

Предельная деформация кожи определяется при сравнении показателей

АЭ эталонного и исследуемого образцов:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{эм} \left[1 - \left(1 - \frac{N_{эм}}{N_\varepsilon} \right)^{1/\gamma_{эм}} \right]^{1/m_{эм}} / \left[1 - \left(1 - \frac{N_1}{N_\varepsilon} \right)^{1/\gamma_1} \right]^{1/m_1}, \quad (2.1)$$

где ε_1 – предельная деформация образца, подвергнутого пробному нагружению; $\varepsilon_{эм}$ – предельная деформация эталона; $N_{эм}$ – интегральная сумма импульсов АЭ, достигнутая при нагружении эталона до $(0,3-0,7)\varepsilon_{эм}$; N_1 – интегральная сумма импульсов АЭ, достигнутая при пробном нагружении образца до $(0,3-0,7)\varepsilon_{эм}$; $m_{эм}$, $\gamma_{эм}$ и m_1 , γ_1 – параметры распределения эталона и пробного изделия.

Таким образом, для осуществления поставленной цели была разработана методика и проведены экспериментальные исследования определения акустической эмиссии при деформировании образцов из натуральной кожи. Установлена взаимосвязь между параметрами АЭ и величиной предельной деформации биокompозита.

3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОЖИ С ПОМОЩЬЮ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ

Известно, что при изготовлении обуви используют анизотропный материал, который обладает упругими пластическими свойствами. Данные характеристики в явном виде в той или иной форме входят в уравнения, связывающие между собой и напряжения и деформации. Большинство изотропных материалов обладает предсказуемыми свойствами и характеристиками. Аналогичные параметры для материалов, используемых в производстве обуви, например, для кожи – не определены. Основная причина в том, что до настоящего времени практически полностью отсутствовали математически обоснованные описания цепочки преобразований материала при производстве и эксплуатации обуви. Вторая причина – собственные свойства кожи, например, такие как анизотропия. Свойства кожи изучаются десятки лет, существует огромная библиография по данной теме (следует особо отметить фундаментальные работы Г.И. Кутянина). Специфика производства (выделки) кожи, разнос параметров жи-

вотных, из шкур которых эта кожа выделяется, а также количество других случайных факторов приводят к тому, что с помощью только стандартных методов сложно предсказать заранее или свести к одному параметру свойства конкретного участка кожи. Для решения задач по прогнозированию поведения материала, например, при формировании внутренней формы обуви необходимо связать параметры кожи с ее деформационными характеристиками.

Кожа как фрактальный объект

Накопленный за десятилетия экспериментальный материал по исследованию кожи позволил систематизировать и классифицировать ряд параметров, характеризующих ее основные свойства.

Классификация структурных элементов кожи и их характерные размеры у разных исследователей различаются. С одной стороны, это говорит о том, что существуют различия в методике подсчетов, о вариации свойств материала; с другой стороны, введение классификаций, не обусловленное на практике потребностями теории строения и описания физико-механических свойств, скорее всего, свидетельствует о внутреннем свойстве кожи, которое мы постараемся далее описать количественно.

Из перечня факторов видно, что любой количественный результат, который мы захотим приписать свойствам конкретного образца кожи, будет стохастическим (случайно сформированным). В качестве основного параметра, который характеризует деформационные свойства кожи на микроуровне, чаще всего упоминается угол сплетения пучков волокон. Угол сплетения указывается в градусах к поверхности шкуры [8], а полнота пучков измеряется окуляр-микрометром по их поперечным размерам. Ценность указанных количественных оценок сомнительна: как средство классификации участка шкуры они не самостоятельны и весьма трудоемки.

В попытке обобщить вышеприведенные параметры, была предложена следующая обобщающая характеристика: кожа – это:

- 1 – сшитый полимер (волокнисто-сетчатая система);
- 2 – вязкоупругий (эластичный) материал.

Сходство кожи с полимерами позволило предложить так называемые реологические модели ее строения по аналогии с принятыми в теории полимеров.

Можно сделать промежуточный вывод: о коже накоплено большое количество сведений, однако теорий ее строения, пригодных для применения в

теоретических исследованиях, не существует.

Основная сложность при построении теории строения кожи – хаотичность ее структуры и случайность факторов, приводящих к формированию этой структуры. Это означает, что существует только два пути построения теории:

- эмпирический – массовые статистические исследования всех типов кож при максимально возможном количестве вариаций условий проведения опытов;
- теоретический – использование при описании свойств кожи параметров (оценок), имеющих стохастическую (вероятностную) природу.

Процедуру применения построенной теории желательно свести к быстрому и экономичному измерению ограниченного набора параметров с последующим выводом об упругих свойствах образца.

Перечислим основные предпосылки к поиску статистических оценок:

- иерархия структурных единиц кожи (микрофибриллы – фибриллы – волокна – пучки волокон);
- углы сплетения пучков волокон;
- извитость пучков волокон;
- пористость (огромная внутренняя поверхность).

Все эти предпосылки говорят об иерархичности и неупорядоченности пространственной структуры кожи. Это определение в точности повторяет нематематические, упрощенные определения фрактала. Дадим несколько определений, вначале формальных, а затем пригодных для расчетов.

Фрактал – объект с фрактальной размерностью. Фрактальная размерность есть мера отличия объекта от топологической базы – пространства, в которое объект погружен. То есть фрактал – это объект, который имеет нецелую размерность в смысле заполнения пространства. Понятие фрактала появилось совсем недавно (в 80-е гг. XX в.), но уже завоевало большую популярность у исследователей во всех областях науки, где приходится сталкиваться с геометрическими объектами, свойства которых трудно описать количественно в рамках традиционной геометрии.

На рисунке 3.1 приведен фрактал, полученный с помощью псевдослучайного моделирования на основе «модели роста»; сходные модели используются при моделировании свойств растворов и расплавов, при изучении полимеров и т. д.

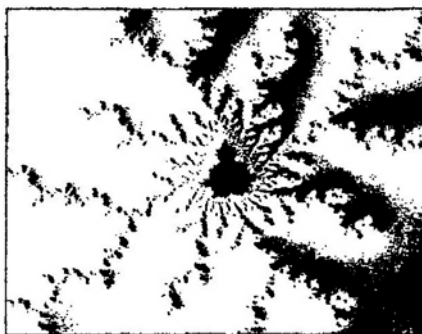


Рисунок 3.1 – Фрактал, полученный с помощью псевдослучайного моделирования на основе «модели роста»

Еще одно определение фрактала можно сформулировать в виде набора следующих признаков в любой комбинации:

- самоподобие (повторяемость структуры);
- выделенный масштаб;
- хаотичность структурных элементов.

На рисунке 3.2 приведено изображение фрагмента поверхности кожи (выросток, чепрачная часть) при большом увеличении под микроскопом (380 x 500 пикселей, размер пикселя 1 мкм).

Все эти три признака у кожи присутствуют. Это означает, что кожа – фрактальный объект. Характеристика кожи как фрактального объекта, в частности, означает, что для количественного изучения свойств кожи не существует выделенного масштаба.

В применении к коже величина фрактальной размерности есть показатель степени хаотичности, спутанности волокон и пучков волокон.

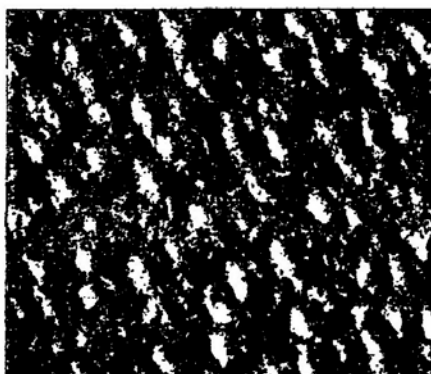


Рисунок 3.2 – Изображение фрагмента поверхности кожи при Большом увеличении под микроскопом

Методика измерения и вычисления фрактальной размерности кожи

Как уже говорилось ранее, для расчета фрактальной размерности реальных объектов существует несколько алгоритмов. Воспользуемся алгоритмом для вычисления массовой (клеточной) размерности, которая и будет являться фрактальной размерностью по факту ее вычисления. Формула, которая связывает массу фрактала с радиусом фрактала и фрактальной размерностью, записывается следующим образом:

$M = R^D$, где D – фрактальная размерность, M и R – соответственно масса и радиус фрактала.

Очевидно, что по этой формуле можно вычислять как фрактальную размерность объекта в обычном трехмерном пространстве, так и на плоскости – именно эти два случая представляют наибольший интерес в применении к коже.

Для проведения измерений были использованы кожи тяжелых развесов хромового дубления; именно такой материал наиболее часто используется в производстве обуви. Участки полужоки были соответствующим образом промаркированы и топографически идентифицированы.

С помощью специального устройства направленного освещения изображение поверхности кожи, полученное при разном увеличении (которое варьировалось в пределах, соответствующих выделенным характерным размерам структурных единиц), фиксировалось ПЗС – матрицей светового микроскопа, сканера или другого устройства в зависимости от требуемого разрешения и передавалось в компьютер для последующей обработки и анализа. Следует отметить, что вычислялась в основном плоская (2-мерная) фрактальная размерность кожи.

Были проведены дополнительные исследования по выявлению зависимости фрактальной размерности от уровня порогового выделения и изображения на фоне, который задавался программно при обработке изображения.

На рисунке 3.3 показана одна и та же область, для которой среднее значение плотности почернения по изображению равно 89,9 усл. ед., а на трех фрагментах показано изображение, из которого вычтен уровень 100, 110, 120 усл. ед. Несмотря на явное различие изображений, расчет показал, что выбор того или иного уровня порогового выделения не влияет на определение фрактальной размерности.



Рисунок 3.3 – Зависимости фрактальной размерности от уровня порогового выделения

Результаты и обсуждение

Для поверхностной фрактальной размерности кожи была получена следующая величина:

$$D_k = 1,62 \pm 0,01.$$

Причем для разных кож получились результаты от 1,59 до 1,64. Особое внимание обращает на себя тот факт, что разброс значений фрактальной размерности внутри одной кожи меньше 0,01 и не зависит ни от участка поверхности, ни от разрешения, с которым участок фотографируется, ни от методики подсчета размерности. Вывод: указанные результаты измерения фрактальных размерностей характеризуют индивидуальные свойства каждой кожи. Это означает, что получена объективная количественная характеристика кожи, напрямую связанная с ее физико-механическими свойствами и доступная к определению в самых простых условиях.

Для выявления зависимости величины фрактальной размерности от стадии кожевенного производства для выбранных кож после подготовительных операций (голье), дубильных операций (дубленый полуфабрикат) на каждом этапе отбирались образцы, для которых по методике, изложенной выше, также определялась фрактальная размерность. Были получены следующие результаты:

$$D_G = 1,78 \pm 0,02,$$

$$D_D = 1,71 \pm 0,02,$$

где D_G , D_D – фрактальные размерности дубленого полуфабриката и голя соответственно.

Видно, что фрактальная размерность уменьшается от исходного сырья к готовому продукту. Это означает, что (поверхностная) структура кожи в про-

цессе кожевного производства становится все более разреженной, рыхлой. Второй вывод – существует возможность количественной оценки стадий обработки кожевного сырья. На рисунке 3.4 показаны зависимости массы от радиуса в двойных логарифмических осях и обозначены цифрами: 1 – голые; 2 – выросток, чепрачная часть – сорт 3; 3 – выросток, чепрачная часть – сорт 2; 4 – дубленый полуфабрикат. Визуально размерность определяется по асимптоте, проведенной к выраженному плато на графике при больших значениях радиуса.

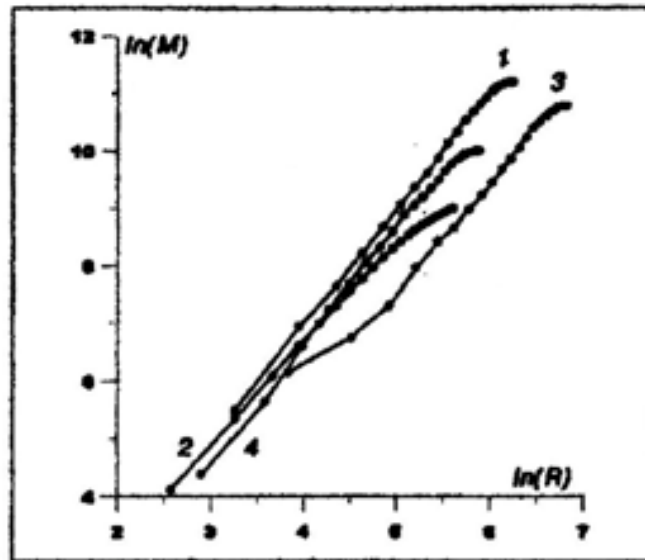


Рисунок 3.4 – Зависимости массы от радиуса в двойных логарифмических осях

Кожа – это материал с разреженной и хаотичной структурой, которую можно представить количественной характеристикой – таков основной вывод по итогам данного раздела. Ясно, что расположение и спутанность волокон влияют (если не являются определяющими) на поведение кожи при деформациях. Таким образом, следует определить фрактальную размерность и связать ее с внутренними свойствами кожи. Такая связь существует. В результате многолетних исследований для кожи была установлена следующая эмпирическая формула:

$$\varepsilon = \alpha P^n,$$

где ε – деформация, %; α – коэффициент, зависящий от структуры кожи; P – растягивающее усилие, Н.

На качественном уровне из сравнения формул следует, что фрактальная размерность для кожи аналогична показателю степени n в формуле, связывающей деформацию кожи с растягивающим усилием. Для подтверждения данной гипотезы достаточно выявить наличие корреляционной зависимости между фрактальной размерностью и деформацией (напряжением).

Были проведены эксперименты по одноосной деформации образцов кож и определению для деформированных образцов фрактальной размерности. Типичный график зависимости «фрактальная размерность – деформация» приведен на рисунке 3.5.

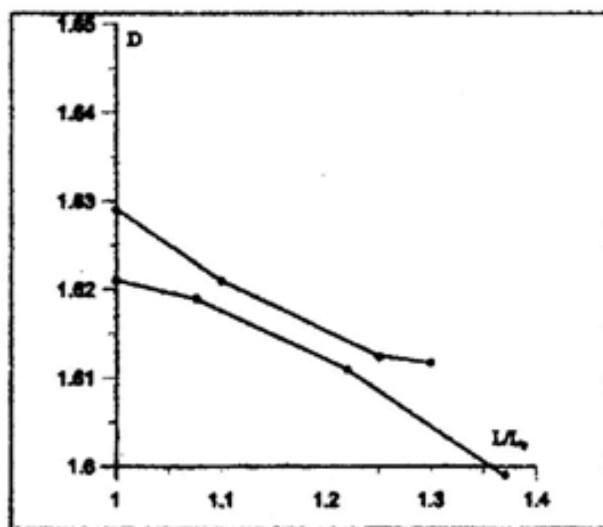


Рисунок 3.5 – Типичный график зависимости «фрактальная размерность – деформация»

На рисунке 3.5 кривые иллюстрируют одноосное растяжение образцов кожи из одной топографической зоны (чепрачная часть) одной кожи (выросток), причем угол взаимной ориентации образцов на коже составлял 90° . Аналогичные результаты получены для других образцов. Это означает, что анизотропные свойства кожи не влияют на величину фрактальной размерности. Связь фрактальной размерности с деформацией может помочь иначе рассмотреть теорию микростроения кожи. Экспресс-оценка свойств конкретного образца кожи может быть получена простым методом непосредственного измерения фрактальной размерности на сканере общего назначения с достаточной разрешающей способностью. На основе этой оценки и выявленных связей фрактальной размерности с тем или иным физико-механическим параметром

кожи можно получить оценку данного параметра, трудоемкую к определению другими способами. В данном случае фрактальная размерность не выявляет закономерностей внутреннего строения материала, но существенно сокращает трудозатраты на оценку свойств материала.

4 МЕТОД РЕЛАКСАЦИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

4.1 Графоаналитическая система моделирования свойств объекта методом релаксационной спектроскопии

Изменения, происходящие в обувных материалах при обработке, отражаются, прежде всего, на подвижности структурных элементов и деформационных свойствах материалов. При резании материалов происходит их деформация сжатия, достижение критической величины которой характеризуется началом процесса разделения структурных элементов материала по линии реза. Таким образом, первый этап процесса резания характеризуется физико-механическими показателями перехода структуры материала из состояния равновесия в «возбужденное» состояние, а второй – показателями деструкции структурных элементов и их восстановления (вне области разрушения).

Материалы, применяемые при производстве изделий легкой промышленности, имеют релаксационный характер поведения при действии внешней силы. В общем случае релаксационными процессами называются протекающие во времени процессы перехода материала (системы материалов) из неравновесного состояния в равновесное. Для качественной и количественной оценки изменений, происходящих в материале при осуществлении на него механического воздействия и после прекращения последнего, проводят одноцикловые испытания.

Метод оценки состояния обувных материалов, основанный на релаксационной спектроскопии, является самым информативным.

Он дает наиболее ясную интерпретацию связи между структурной подвижностью и релаксационными процессами в материалах.

В МГУДТ разработан новый метод оценки деформационных свойств кожи на основе компьютерного анализа процесса нагружения и релаксации материала [9-10].

Анализ этого процесса позволяет выделить три компоненты деформации и рассчитать шесть показателей, наиболее полно описывающих упругие, вязкие и пластические свойства материалов и их систем. Эти данные в целом наиболее полно характеризуют деформационное поведение последних, отражают подвижность разнообразных элементов его внутренней макро- и микроструктуры.

При испытаниях на растяжение материал зажимается по кольцевому контуру и нагружается по центру полусферическим индентором [9-10]. Нагрузка на инденторе будет интегральной от нагрузок по всем направлениям и, следовательно, независимой от ориентации пробы относительно прибора. Таким образом, при испытании продавливанием зажатого по кольцевому контуру образца будут получены усредненные характеристики анизотропного материала, независимо от его ориентации. Компьютерная установка «RELAX» (рис. 4.1), используемая в МГУДТ и в лаборатории Технологии кожи ЦНИИКП, состоит из персонального компьютера, электромеханического прибора-датчика и электронного блока преобразования сигнала. Порядок работы в системе «RELAX» может быть представлен в виде схемы (рис. 4.2).



Рисунок 4.1 – Общий вид компьютерного комплекса «RELAX»

Получаемые показатели могут быть использованы для оценки и сертификации качества кож и других подобных материалов путем сравнения их с эталоном, а также для контроля и управления параметрами технологических процессов путем оценки характеристик полуфабриката на промежуточных этапах и сравнения их с нормированными значениями.

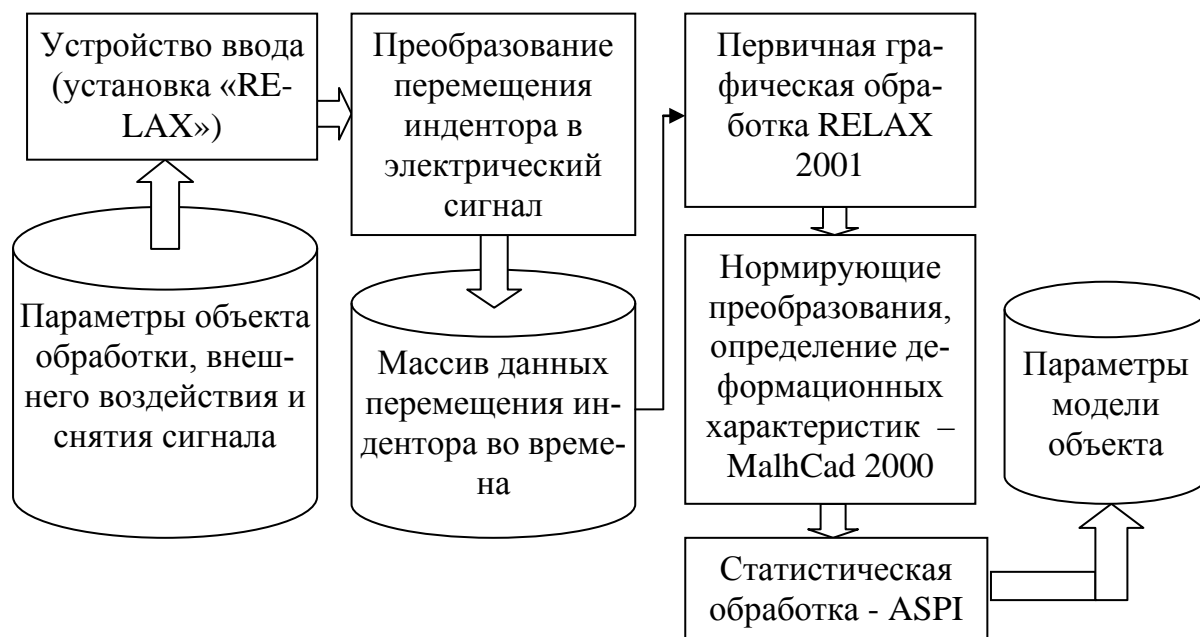


Рисунок 4.2 – Структура графоаналитической системы моделирования свойств объекта на базе метода релаксационной спектрометрии

Новая версия установки «RELAX-M» рассчитана на работу в среде Windows-98 и XP и предоставляет пользователю значительно больше возможностей и удобств в работе по сравнению с предыдущими модификациями и другими типами приборов подобного назначения. Для автоматизации и повышения четкости разгрузки образца (независимо от требуемой ранее высокой квалификации оператора) применен новый электромагнитный механизм нагружения-разгрузки образца, для чего разработан специальный компактный и мощный электромагнит с малым потреблением тока. Магнит имеет размеры: диаметр 40 мм, высоту 25 мм, силу удержания до 70 Н, потребляет ток не более 0,2 А. Нагрузка на образец при подъеме рычага и включении магнита передается через электромагнит на соответствующую ему стальную пластину индентора. При отключении магнита рычаг с грузом четко отсоединяется от диска и индентор мгновенно разгружается. При этом конструкция механической части установки существенно упрощена, так как исключен ряд сложных деталей механизма ручного отключения. Увеличен размер рабочего зазора прибора по вертикали, а нижний диск зажимного устройства сделан съемным, в двух вариантах – с кольцевой насадкой для испытания образцов на растяжение, и с пло-

ской насадкой для испытания образцов большой толщины или настилов тонких материалов на сжатие, что облегчается также благодаря увеличенному рабочему зазору прибора.

Наконечник индентора выполнен съемным, что позволяет закреплять его сферическим концом к образцу при испытании на растяжение, и плоским концом – при испытании на сжатие. Полностью переработана электронная часть прибора, благодаря чему повышена точность и стабильность работы измерительной части, резко снижен уровень помех. Введена светодиодная индикация включения магнита и чтения данных. Интерфейс программы управления процессом снятия показаний и обработки данных предусматривает постоянную цифровую индикацию положения индентора на экране, что позволяет контролировать начальное провисание образца и процесс его релаксации под нагрузкой и после ее снятия.

4.2 Теоретические основы метода

Полная деформация материала с упруго-вязко-пластическими свойствами включает три составляющие [9-10]:

- мгновенно-упругую, связанную с изменением средних расстояний между атомами и валентных углов в молекулах;
- высокоэластическую (или запаздывающую) деформацию, связанную с ориентацией в силовом поле цепей макромолекул, при этом преодолевается трение между ними, что и обуславливает запаздывание развития деформации при приложении нагрузки, а также замедление восстановительной деформации после снятия нагрузки – процесс релаксации;
- пластическую, связанную с необратимым перемещением молекул.

$$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_{\text{МУ}} + \varepsilon_{\text{ВЭ}} + \varepsilon_{\text{ПЛ}}. \quad (4.1)$$

Деформационное поведение кожеподобных материалов после мгновенного снятия нагрузки описывается уравнением:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \left(\frac{\sigma_0}{E_1} \right) e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \left(\frac{\sigma_0}{E_2} \right) e^{-\frac{t}{\tau_2}} + \left(\frac{\sigma_0}{\eta_3} \right) \Delta t, \quad (4.2)$$

где E_1 – модуль мгновенной упругости; E_2 – модуль высокоэластичности; $T_1 = \eta_1/E_1$ – постоянная времени быстрого процесса релаксации; $T_2 = \eta_2/E_2$ – постоянная времени медленного процесса релаксации; η_1, η_2 – коэффициенты вязкости соответственно быстрого и медленного процессов релаксации; η_3 – коэффициент пластической вязкости; Δt – время развития пластической деформации (время нагружения).

Из анализа кривой упругого последействия могут быть определены все пять параметров реологической модели, и, кроме того, шестой параметр E_3 , равновесный модуль упругости, проявляющийся при достаточно длительном наблюдении.

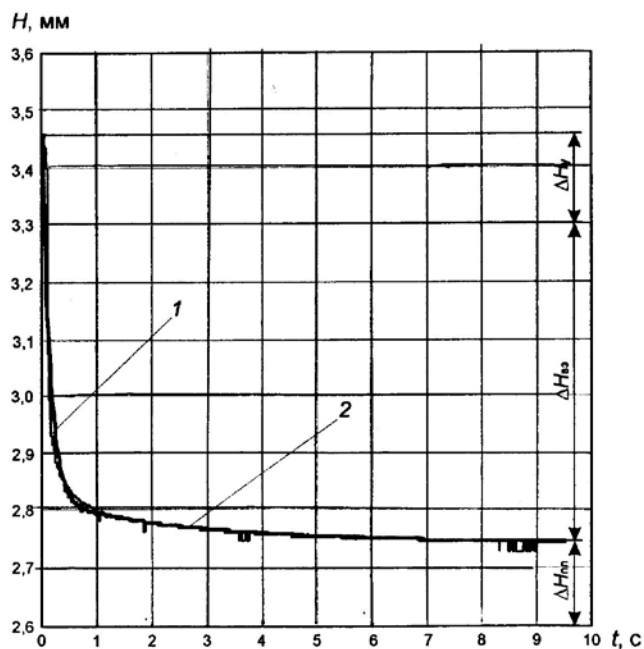


Рисунок 4.3 – Кривые релаксации: 1 – эмпирическая; 2 – теоретическая

Известные и описанные в литературе графоаналитические методы определения параметров релаксационной модели исходят из представления начального участка релаксации вертикальным, так как используемая аппаратура обычно не может зарегистрировать его наклон. Именно поэтому принято считать деформацию на этом участке «мгновенно-упругой». При ручной обработке кривой релаксации определить величину T_2 можно лишь приближенно, а T_1 – вообще невозможно. Только описываемая компьютерная установка позволяет с

высокой точностью и автоматически получать все шесть указанных параметров, наиболее полно характеризующих деформационное поведение кожи.

Весьма важной особенностью кожи является ее способность «помнить» предшествующие воздействия на нее в течение достаточно большого интервала времени. Это свойство можно приближенно описать с помощью теории наследственной вязкоупругости Больцмана-Вольтерры, построенной на основе двух принципов:

1. Упругие силы в коже зависят не только от мгновенно полученных, но и от предшествующих деформаций, влияние которых убывает с течением времени от момента воздействия.

2. Влияние полученных в разное время деформаций складывается (принцип суперпозиции).

На основе этих принципов связь между напряжением и деформациями можно описать интегральным уравнением Вольтерры 2-го рода:

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) - E \int_0^t T(t - \tau)\varepsilon(\tau)d(\tau), \quad (4.3)$$

где t – текущее время; τ – предшествующее время; $(t - \tau)$ – функция влияния деформации $\varepsilon(\tau)$ в момент времени τ на напряжение σ .

4.3 Спектры времен релаксации

Швейные и обувные материалы и, в частности, кожа, по своей структуре весьма сложные системы, состоящие из ряда подсистем, моделью которых могут быть кинетические элементы-релаксаторы [9-10]. Ввиду структурной неоднородности материала эти элементы находятся в разных условиях, их подвижность не может характеризоваться одним наивероятнейшим временем релаксации, а описывается спектром времен. Дискретным и непрерывным, в соответствии с этим утверждением, подтвержденным экспериментально, ядро интегрального уравнения (4.3), описывающего динамическую модель кожи, можно представить в виде:

$$T(t - \tau_1) = \sum_{i=1}^N E_i e^{-\frac{t}{\tau_i}}, \quad (4.4)$$

где $L(\tau)$ – непрерывный спектр времен релаксации; E_i – коэффициенты с размерностью модуля упругости, учитывающие влияние релаксационного процесса с постоянной времени T_i на общий процесс релаксации.

Спектр времен релаксации – кривая распределения податливостей отдельных структурных групп по их постоянным времени релаксации. В случае испытания кожи ось абсцисс графика – постоянные времени релаксации структурных групп элементов дермы, а ось ординат – их податливость (обратная величина модуля упругости, то есть отношение деформации к напряжению с размерностью 1/МПа).

Для получения спектров по экспериментальным кривым релаксации можно использовать так называемое второе приближение Шварцля-Стевермана в натуральном времени:

$$L(t) = t^2 \frac{d^2 J(t)}{dt^2} \quad t=2\tau,$$

где $J(t) = d\varepsilon(t)/d\sigma(t)$ – модуль податливости, $\varepsilon = 1,26 \times 10^{-3}$, $\sigma = 0,32$ Р/Нδ.

$$L_i = 2,52 \frac{t_i}{s} \left[\left(\frac{K_1}{T_1} e^{-\frac{t_i}{T_1}} + \frac{K_2}{T_2} e^{-\frac{t_i}{T_2}} \right) + \left(K_1 e^{-\frac{t_i}{T_1}} + K_2 e^{-\frac{t_i}{T_2}} \right) \left(\frac{K_1}{T_1^2} e^{-\frac{t_i}{T_1}} + \frac{K_2}{T_2^2} e^{-\frac{t_i}{T_2}} \right) \right].$$

Спектр времен релаксации удобен для сравнения деформационных свойств двух или более образцов, при этом наглядность такого сравнения существенно зависит от формы представления спектра.

Программное обеспечение установки позволяет получить четыре основные формы спектра (рис. 4.4):

- обе оси в натуральных единицах;
- логарифмическая ось податливости;
- логарифмическая ось времен релаксации;
- обе оси логарифмические.

Очевидно, что последняя форма графика в логарифмических координатах наиболее ясно выявляет отличия в характере спектра.

Функция $L(t)$ не монотонна, на ней имеется ряд максимумов, соответствующих наиболее вероятным временам релаксации отдельных струк-

турных групп. Для кожи обнаружено по крайней мере три таких максимума, величина которых измеряется в долях секунды, единицы и сотни (тысячи) секунд.

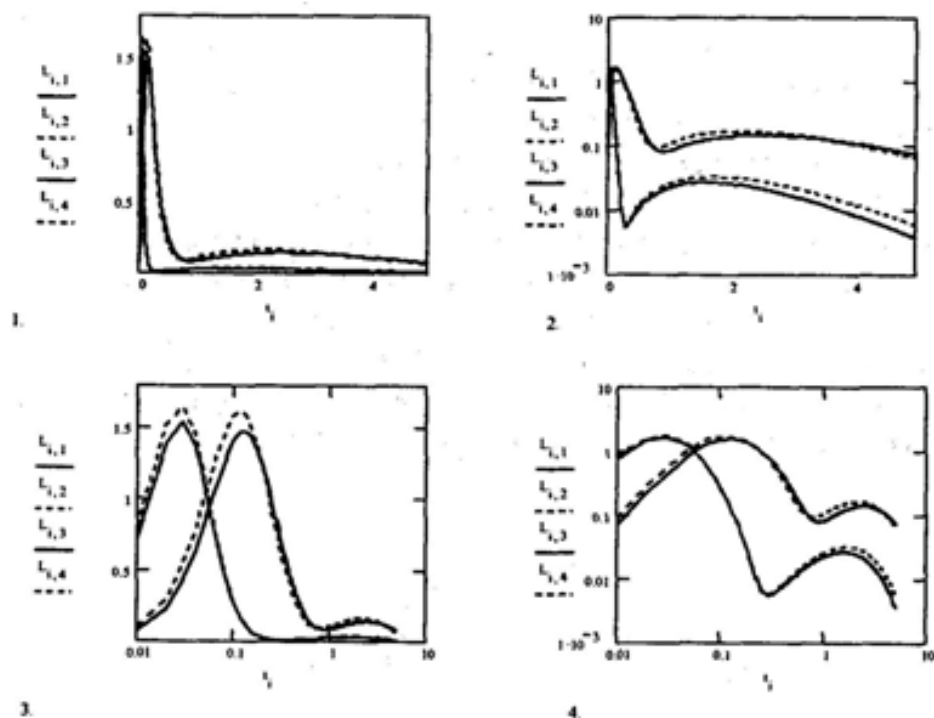


Рисунок 4.4 – Формы спектров времен релаксации

Релаксационный спектр объективно отражает структурные особенности вязко-упруго-пластического материала, наглядно и чутко реагирует на изменение подвижности структурных элементов.

4.4 Датчик релаксационных характеристик

На рисунке 4.5 представлена расчетная схема датчика релаксационных характеристик (ДРХ) [10], на рисунке 4.6 – общий вид датчика. При испытаниях на растяжение образец материала помещается между верхним и нижним кольцевыми фиксаторами, зажимающими материал по кольцевому контуру внутренним диаметром «2R», усилие зажима материала между фиксаторами обеспечивается специальным устройством. Перед фиксацией материал натягивается (если это необходимо) за счет системы «зажим-груз». Этот элемент дат-

чика конструктивно может быть решен по другому, важно, чтобы был обеспечен надежный зажим материала между фиксаторами. При этом материал подвергается симметричному нагружению, получая равные деформации по всем образующим конуса.

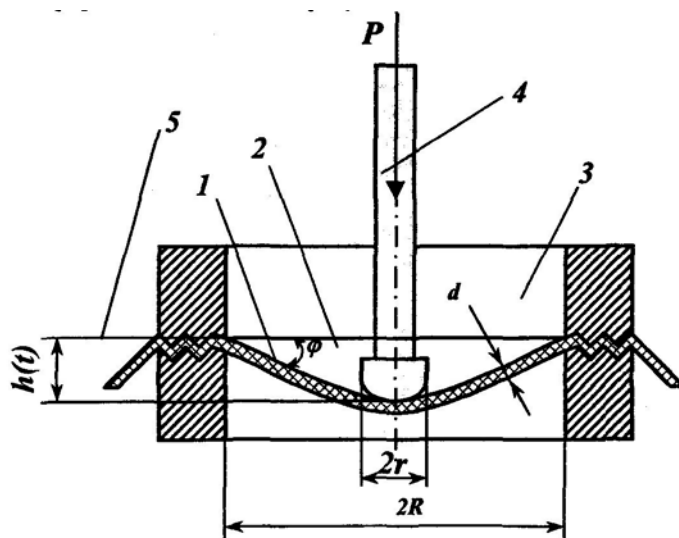


Рисунок 4.5 – Расчетная схема для пояснения метода измерений релаксационных характеристик материала:

- 1 – материал; 2 – нижнее кольцо; 3 – верхнее кольцо;
4 – индентор; 5 – уровень «0» индентора

По оси зажимных колец установлен индентор – цилиндрический стержень, на нижнем торце которого установлен сферический наконечник диаметром « $2r$ », контактирующий с поверхностью исследуемого материала, индентор может свободно перемещаться по вертикали. Индентор связан с двумя блоками: блоком 1 автоматического нагружения/разгружения и блоком преобразования перемещения индентора в электрический сигнал.

Блок 1 автоматического нагружения-разгружения обеспечивает постоянное нагружение до заданной нагрузки « P » выдержку материала под постоянной нагрузкой « P » с заданным интервалом времени и мгновенное разгружение.

Блок 2 обеспечивает линейное преобразование перемещения индентора « $h(t)$ », мм, в электрический сигнал-напряжение « $U(t)$ », мВ.

В начальном (исходном) положении индентор опущен, его наконечник контактирует с материалом, нагрузка $P = 0$, при этом регистрируется начальный («нулевой») уровень индентора. Затем включают блок 2, начинается плавное (без удара) нагружение индентора и выдержка материала (20-30 с.) под посто-

янной нагрузкой. Материал под действием нагрузки деформируется (растягивается), при этом индентор смещается вниз на величину « $h(t)$ ». При мгновенном снятии нагрузки P происходит упругое восстановление (релаксация) материала и индентор смещается вверх, но не приходит в исходное состояние за счет остаточной (пластической) деформации.

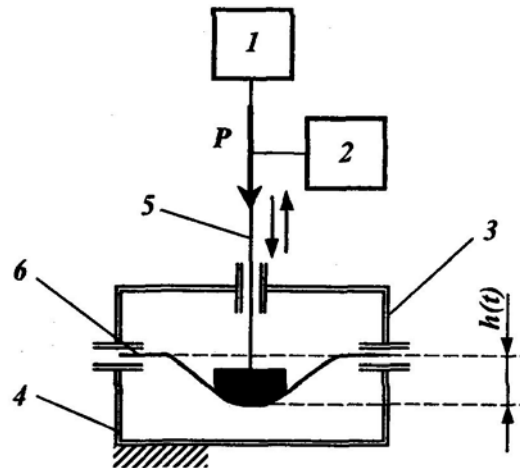


Рисунок 4.6 – Кинематическая схема установки «RELAX»:

- 1 – блок нагружения – выдержки – мгновенного разгружения;
- 2 – блок преобразования перемещений; 3 – верхний кольцевой зажим;
- 4 – нижний кольцевой зажим; 5 – индентор (шток); 6 – образец материала

Удлинение по меридиану образовавшихся при деформации материала конуса и части сферы:

$$\varepsilon(t) = \left(c + \frac{d}{R} \right) [\varphi(t) - \operatorname{tg}(\varphi(t))] + \frac{1}{\cos(\varphi(t)) - 1}, \quad (4.6)$$

где $C = r/R$ – постоянная датчика; d – толщина материала; $\varphi(t)$ – угол при основании конуса.

Смещение индентора $h(t)$:

$$h(t) = \left(R - d \operatorname{tg} \frac{\varphi(t)}{2} \right) \operatorname{tg}(\varphi(t)) + r - \frac{r}{\cos(\varphi(t))}. \quad (4.7)$$

Исключив из (4.6), (4.7) угол $\varphi(t)$, получим зависимость:

$$\varepsilon(t) = Ah^2(t). \quad (4.8)$$

Обработка экспериментальных данных показывает, что эта зависимость хорошо аппроксимируется параболой:

$$\varepsilon(t) = f[h(t)]. \quad (4.9)$$

При значениях данных датчика: $R = 20$ мм, $r = 3$ мм, $d = 1$ мм, величина $A = 1,26E-4$. При полном ходе индентора $h_{\max}(t)$ до 8 мм и изменении толщины d от 0,7 до 1,5 мм ошибка от такой аппроксимации не превышает 5 %.

Напряжение σ , возникающее по образующей конуса деформируемого материала, связано с нагрузкой P на инденторе:

$$P = \sigma^2 \pi r d \sin \varphi. \quad (4.10)$$

В то же время напряжение σ по образующей конуса изменяется в соответствии с изменением радиуса от r до R по линейному закону. Тогда среднее напряжение σ_0 будет равно:

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{P}{\pi d (r + R) \sin \varphi}. \quad (4.11)$$

Уравнения (4.6), (4.7) и (4.11) позволяют, задаваясь рядом значений $\varphi(t)$, найти h , ε , σ_0 модуль податливости ε/σ_0 , а значит определить его изменение при ходе индентора $h(t)$. Расчетом на компьютере получена аппроксимирующая формула:

$$\sigma_0 = B \frac{P}{h_{\max} d}, \quad (4.12)$$

где $B = 0,32$ для указанных выше данных датчика.

Ошибка от аппроксимации при указанных данных не превышает 3 %.

5 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И СИСТЕМ МАТЕРИАЛОВ НИЗА ОБУВИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ИНДЕНТИРОВАНИИ

Методика проведения исследования вязкоупругих свойств материалов и систем материалов низа обуви при динамическом индентировании.

Исследование вязкоупругих свойств материалов низа обуви при сжимающей нагрузке производилось на приборе, недавно изобретенном технопарком БНТУ "Метолит" и предназначенном для измерения вязкоупругих свойств полимеров Импульс-1Р (рис. 5.1) [11].

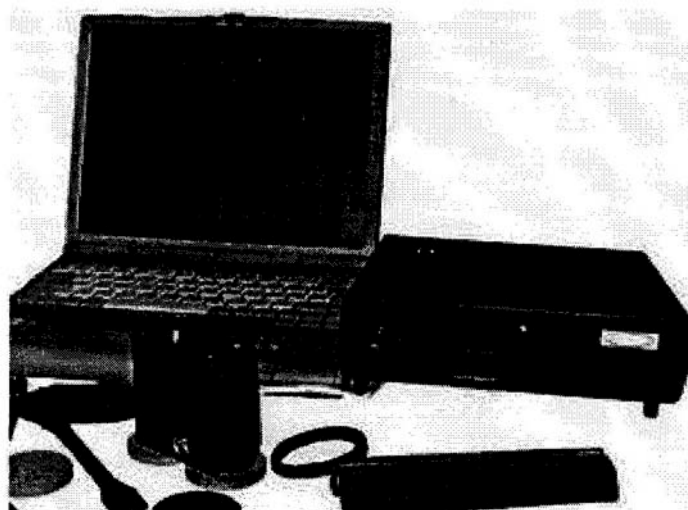


Рисунок 5.1 – Изображение прибора Импульс-1Р

Исследование вязкоупругих свойств материалов при динамическом индентировании заключается в следующем: жёсткий боёк (индентор), падая с определённой высоты, ударяет по поверхности испытуемого материала и отскакивает от неё. Индентор имеет форму сферы радиусом 0,000125 м и массу 0,00399 кг. Замеряется высота отскока. Так как высота отскока после удара пропорциональна потере энергии, то отношение высоты отскока бойка к начальной высоте его сбрасывания может служить мерой реологических свойств материала. Оценка реологических свойств материала при динамическом индентировании производится по результатам обработки принятой дискретной моде-

ли деформирования материала. Устройство и принцип работы установки Импульс-1Р: установка состоит из датчика, электронного блока АЦП, измерительного кабеля и интерфейсного шлейфа, а также комплекта специального программного обеспечения для персонального компьютера. Датчик состоит из корпуса, механизма спуска, поворотного рычага, с прикреплённым к нему индентором и постоянным магнитом, катушки индуктивности, устройства фиксации индентора в верхнем положении, пружины разгона индентора.

Все показатели вязкоупругих свойств материалов на данной установке рассчитываются с помощью прикладной программы.

Твердость по Шору определяется в соответствии с ГОСТ263-75. Резина. Метод определения твердости по Шору А. [12].

Прибор Импульс-1Р проградуирован также непосредственно в единицах IRHD.

Твердость в международных единицах (IRHD) определяется согласно ГОСТ 20403-75 [13]. Производится измерение глубины внедрения индентора под действием постоянной силы (IRHD International Rubber Hardness Degree).

Измеренная глубина вдавливания переводится в международные единицы твердости, шкала которых установлена так, что 0 соответствует твердости материала с модулем упругости, равным нулю, а 100 – твердости материала с модулем упругости, равным бесконечно большой величине.

Зависимость глубины проникновения сферического наконечника индентора от твердости IRHD основана на:

- применении вероятностной кривой (интегрированной зависимости нормального распределения ошибок), связывающей LgE и твердость в единицах IRHD. В точке перегиба $LgE=1,372$, максимальный наклон равен 57 единиц IRHD на единицу увеличения LgE ;

- зависимости между глубиной проникновения индентора в материал и модулем упругости, вычисляемой по эмпирической формуле:

$$\frac{P}{E} = 0,0038R^{0,65}a^{1,35}, \quad (5.1)$$

где P – величина силы под воздействием полной нагрузки, Н; E – модуль упругости, МПа; R – радиус индентора, мм; a – глубина внедрения индентора (0,01 мм).

Если выразить глубину внедрения индентора в миллиметрах, то коэффициент 0,0038 изменится на 1,9:

$$\frac{P}{E} = 1,9 R^{0,65} a^{1,35} \quad (5.2)$$

где P – сила, Н; E – модуль упругости, МПа; R – радиус индентора, мм; a – глубина внедрения индентора, мм.

Переход от глубины внедрения a к модулю упругости E осуществляется по формулам (5.1), (5.2). С помощью рисунка 5.2 глубина внедрения связывается с твердостью IRHD.

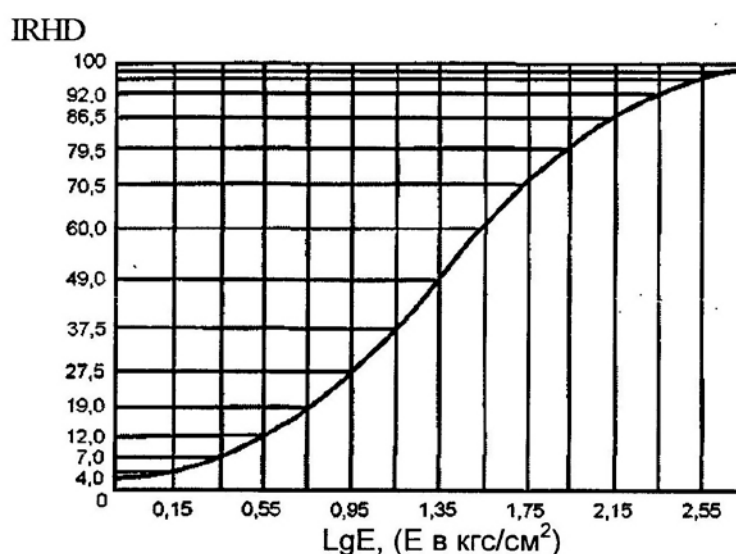


Рисунок 5.2 – Кривая интеграла вероятностей, связывающая логарифм модуля упругости E с твердостью по шкале IRHD

Деформирование эластомерного материала во время удара является термодинамически необратимым, поскольку релаксационные процессы, происходящие в эластомерных материалах, не успевают привести его в равновесное состояние. Наличие этих процессов обуславливают диссипацию (потери) энергии при ударе. Поскольку релаксационные процессы по своей природе более медленные по сравнению со скоростью деформирования, то возникает дополнительная «вязкая» сила сопротивления вдавливанию при ударе. Непосредственно учет такой дополнительной силы предусматривается в нелинейной модели, в основу которой положено общее выражение для контактной силы при динами-

ческом ударном индентировании вязкоупругого материала:

$$P = P_y + P_v, \quad (5.3)$$

где P_y – упругая составляющая контактного усилия, P_v – вязкая составляющая силы сопротивления вдавлению индентора.

Исходя из того, что при скорости $v=0$ (конец активного этапа удара $\alpha=\alpha_{\max}$) вязкая составляющая контактного усилия равна нулю и общее контактное усилие определяется упругой составляющей силы сопротивления вдавлению индентора, значение динамического модуля упругости может быть легко найдено по формуле:

$$E_{\text{дин}} = 0,56 \frac{P_{\alpha_{\max}}}{R^{1/2} \alpha_{\max}^{3/2}}, \quad (5.4)$$

где $P_{\alpha_{\max}}$ – нагрузка, соответствующая максимальному внедрению, Н.

Вязкость по модели Максвелла определяется, исходя из уравнения реологической модели Максвелла:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{E} \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\sigma}{\eta}, \quad (5.5)$$

где ε – деформация, мм, E – модуль упругости, Па, σ – напряжение, Па, η – коэффициент вязкости, Н*с.

Вязкость по модели Фойгта определяется, исходя из уравнения реологической модели Фойгта:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}. \quad (5.6)$$

Время активного этапа удара – время, за которое индентор достигает своего максимального внедрения в материал (его скорость при этом падает до нуля). После чего начинается пассивный этап удара (разгрузка), на котором индентор движется в обратном направлении и контакт между индентором и материалом разрывается.

Соответственно скорость полета – скорость в момент начала контакта, отлета – в момент разрыва контакта.

Энергия деформирования – численно равна площади под кривой сила-

перемещение на его активной части (и равна кинетической энергии индентора в момент контакта).

Энергия упругого деформирования – численно равна площади под кривой сила-перемещение на пассивном этапе удара.

Разность – вязкая часть энергии деформирования (характеризует потери на деформирование).

Тангенс потерь – сдвиг фаз между временем достижения максимального контактного усилия и временем достижения максимального внедрения.

Наиболее информативной и полезной для анализа характеристик материалов является зависимость $P(\alpha)$, представленная на рисунке 5.3, которая получается из кривых $P(f)$ и $\alpha(t)$ путем исключения времени как параметра.

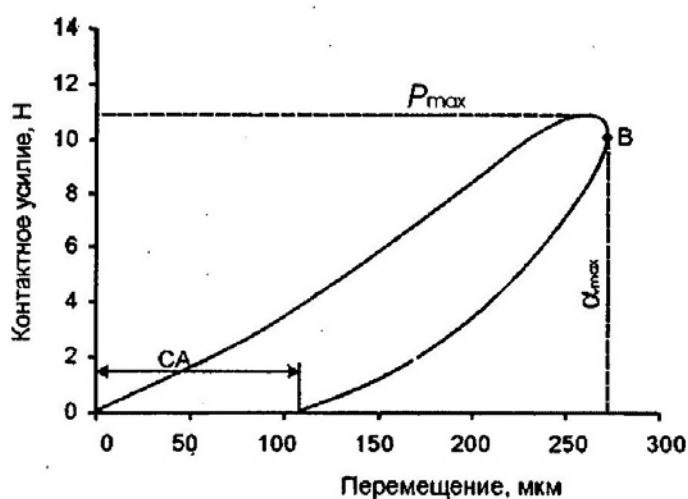


Рисунок 5.3 – Зависимость контактное усилие-перемещение $P(\alpha)$

На рисунке 5.3 окончание активного этапа удара, обозначенное точкой В, соответствует максимальной глубине внедрения индентора α_{max} . При этом, как видно из рисунка 5.3, максимальное внедрение не совпадает с максимальным контактным усилием P_{max} , что говорит об отставании по времени перемещения от контактного усилия. Несовпадение по времени максимальных значений усилия и глубины внедрения индентора говорит о характерном признаке вязкоупругости, свойственном всем полимерным материалам. Также следует, что за время удара не происходит полностью восстановление отпечатка, образующегося при индентировании, т. е. по окончании пассивного этапа удара кривая $P(\alpha)$ не приходит в начало координат, а отсекает на оси абсцисс отрезок СА, величина которого характеризует запаздывание деформации.

Литература

1. Жихарев, А. П. Практикум по материаловедению в производстве изделий легкой промышленности : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / А. П. Жихарев, Б. Я. Краснов, Д. Г. Петропавловский ; под ред. А. П. Жихарева. – Москва : Издательский центр «Академия», 2004. – 464 с.
2. Белокуров, В. Н. Деформационные процессы в вязкоупругих материалах в квазистатическом и динамическом резонансном режимах : монография / В. Н. Белокуров. – Москва : ИИЦМГУДТ, 2006. – 246 с.
3. Белокуров, В. Н. Устройство для определения жесткости кожи / В. Н. Белокуров // Кожевенно-обувная промышленность. №10, 1991. – С. 32-33.
4. Белокуров, В. Н. Определение деформационных показателей в вязкоупругих материалах и тел в динамическом режиме / В. Н. Белокуров, С. В. Роде // Сборник научных трудов МГУДТ. – Москва, 2005. – С. 30-40.
5. Соколовский, А. Р. Исследование акустической эмиссии при деформации пористо-волоконистых биокомпозитов / А. Р. Соколовский [и др.] // Кожевенно-обувная промышленность. – 2008. – №4 – С. 45.
6. Жихарев, А. П. Применение метода акустической эмиссии для определения предельных деформаций / А. П. Жихарев [и др.] // Кожевенно-обувная промышленность. – 2008. – №5 – С. 35.
7. Кутяпин, Г. И. Исследование физико-механических свойств кожи / Г. И. Кутяпин. – Москва : Гизлегпром, 1956.
8. Кутяпин, Г. И. Роль межфибриллярных проходных цепей в формировании деформационно-прочностных свойств кожи / Г. И. Кутяпин, Л. И. Кутяпина // Кожевенно-обувная промышленность. – 1995. – №5-6.
9. Бурмистров, А. Г. Автоматизация контроля деформационных свойств кожи на установке «RELAX» / А. Г. Бурмистров, А. В., Кочеров, А. М. Манукян // Кожевенно-обувная промышленность. – 2000. – №4.
10. Островский, К. Ю. Датчик перемещения для измерения релаксационных характеристик / К. Ю. Островский, С. А. Григоровский, Ю. К. Островский // Кожевенно-обувная промышленность. – 1999. – №3.
11. Установка импульс-IP : патент 2693 и 2006.04.03 Республика Беларусь / заявитель и патентообладатель технопарк БНТУ «Метолит». – w.w.w.metolit.by.
12. ГОСТ 263-75. Резина. Метод определения твердости по Шору А. –

Введ. 1989-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1989. – 6 с.

13. ГОСТ 20403-75. Резина. Метод определения твердости в международных единицах. – Введ. 1975-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1992. – 10 с.