

ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ

Том (A) X

СОЕДИНЕНИЯ

№ 6

1968

УДК 678.01:53

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РЕЛАКСОМЕТР (РЕЛАКСОГРАФ РФ-1) *

В. Т. Фаерман, В. В. Корзин, В. В. Дронников

Способность полимерных материалов, например волокон и пленок, к деформации во времени в режиме нагрузка — разгрузка — отдых является важной характеристикой их эксплуатационных свойств. Для оценки этой способности полимерных волокон и пленок разработаны приборы, называемые релаксометрами.

В настоящее время известен ряд релаксометров механического типа, отличающихся особенностями их конструкций. Из таких приборов релаксометр РМ-5, разработанный Кукиным и Соловьевым [1], выгодно отличается от остальных возможностью одновременного испытания пяти образцов. Наряду с неоспоримыми достоинствами указанных релаксометров им присущи существенные недостатки. Так, указанные приборы являются не автоматическими и не позволяют производить испытания в вакууме или в нейтральной газообразной среде. Кроме того, указанные релаксометры, как правило, не снабжены самописцем.

В этой связи разработка других типов релаксометров является целесообразной.

Калининским НИИ текстильной промышленности на основе динамометра Усманова — Каргина [2, 3] разработан автоматический электромагнитный релаксограф РФ-1, описание которого приводится в настоящей статье.

Принцип действия релаксографа **. В отличие от релаксометров механического типа в релаксографе РФ-1 нагрузка на образец осуществляется магнитным полем соленоида, которое воздействует на ферромагнитный грузик, прикрепленный к концу образца.

Условие однородности магнитного поля соленоида [4] состоит в том, что отношение длины соленоида к его диаметру должно быть больше 10. В нашем случае это условие нарушено и поэтому поле в соленоиде неоднородно. Неоднородность поля означает зависимость величины прилагаемой к образцу нагрузки от положения грузика относительно соленоида. Чем глубже внутрь соленоида будет уходить грузик, тем больше будет нагрузка на образец при прочих равных условиях. Для устранения такой нежелательной зависимости в ходе испытаний необходимо стремиться к тому, чтобы положение грузика относительно соленоида было неизменным. Это достигается тем, что изменение положения грузика относительно соленоида компенсируется точно таким же перемещением соленоида.

Особенность релаксографа состоит в том, что в нем обеспечивается автоматическое поддержание грузика на определенном уровне относительно соленоида, осуществляемое с помощью фотоэлектронной следящей системы.

Остановимся на общем устройстве релаксографа. Прибор (рис. 1) состоит из следующих основных частей: соленоида 1, ампулы 17 с испытуемым образцом 3, фотоэлектронной следящей системы, состоящей из осветителя 4 и фотосопротивления 5; исполнительного механизма 6, реле времени, универсального источника питания, выпрямителя и самописца 7.

После перемещения в ампулу образца с прикрепленным к его концу диском 8 и ферромагнитным грузиком 8а добиваются такого положения, при котором диск закрывает луч света и фотосопротивление не освещено. Растижение образца вызывает смещение диска вниз и тем самым открывает путь света к фотосопротивлению. Освещение фотосопротивления приводит в конечном итоге к включению исполнительного механизма, производящего опускание соленоида. Вал исполнительного механизма связан с потенциометром, с которого снимается напряжение на самописце. Таким образом, величина перемещения соленоида, повторяющего деформацию образца, записывается самописцем. После заданного времени нагружения образца

* Доложено на XVI конференции по высокомолекулярным соединениям, Рига, май, 1966 г.

** В работе принимали участие сотрудники КНИИТП Морковин В. А., Александрова А. С., Скачкова Г. Н., Нелина Г. В.

реле времени отключает ток в соленоиде, что приводит к разгрузке и релаксации деформации образца. Фотоэлектронная система теперь следит за сокращением образца и дает сигналы исполнительному механизму на подъем соленоида. После полного цикла нагрузка — разгрузка — отдых самописец вычерчивает релаксограмму.

Конструкция прибора. Основой релаксографа (рис. 1) служит стол 10, на котором закреплены две стойки (направляющие стержни) 11. В верхней части они за-

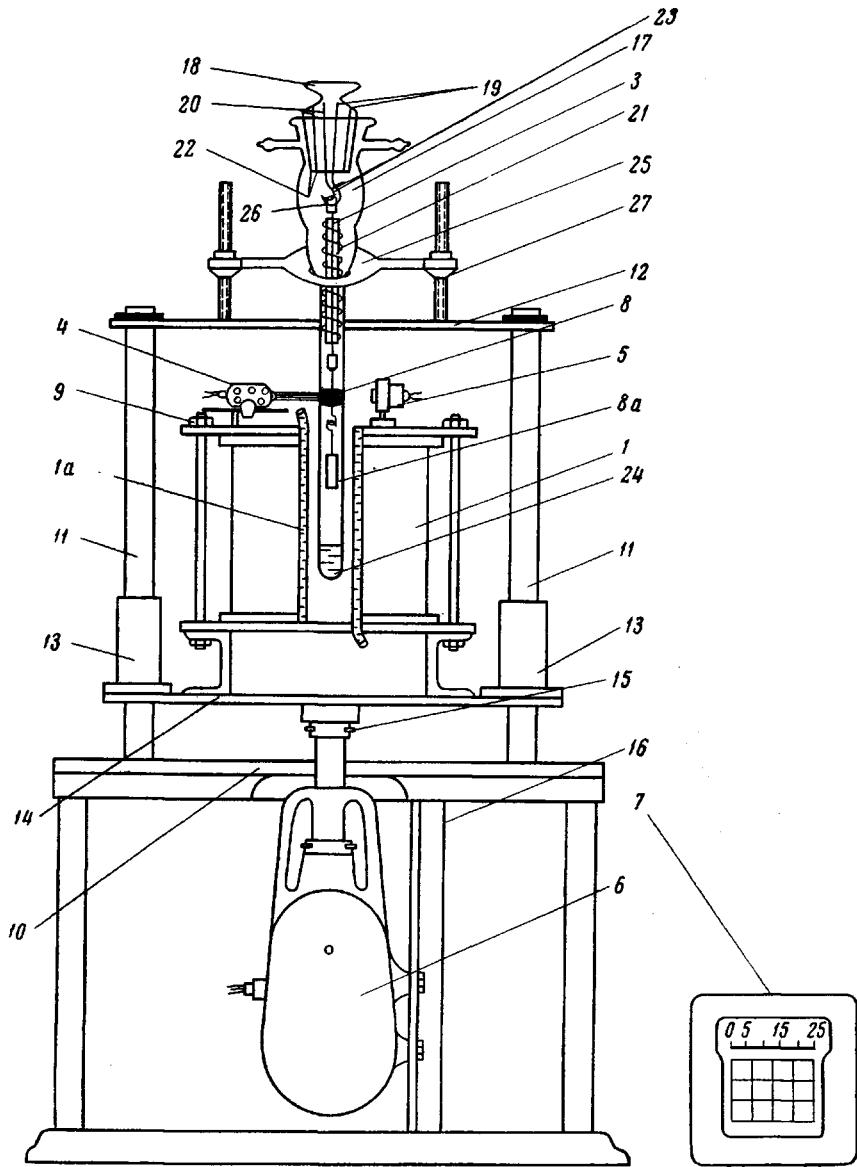


Рис. 1. Схема электромагнитного релаксографа

креплены неподвижной связью 12. По направляющим свободно ходят втулки 13, соединенные с фланцем 14. К центру фланца с нижней стороны приварен шток 15, скрепленный с поршнем исполнительного механизма 6. Исполнительный механизм крепится на кронштейне 16. Соленоид размещается на фланце. Он закрепляется с помощью двух стержней и пластины. Особенностью конструкции соленоида является наличие кожуха вокруг стержня соленоида 1a, позволяющего производить его водяное охлаждение, что предохраняет ампулу от нагревания при пропускании тока в соленоиде.

Соленоид и его градуировка. Соленоид (магнитная катушка) является основным элементом прибора. Если в соленоид поместить ферромагнитный грузик, закрепив

его на растяжимой нити, то при пропускании тока по обмотке соленоида появится магнитное поле, которое создаст усилие на грузик и втянет его во внутрь.

Для получения зависимости силы воздействия магнитного поля соленоида на ферромагнитный грузик от параметров соленоида воспользуемся известными формулами для напряженности магнитного поля соленоида, магнитной индукции и подъемной силы магнита [5]

$$H = I\omega_0 \quad (1); \quad B = \mu\mu_0 H \quad (2); \quad F = \frac{B^2 S}{\mu_0}, \quad (3)$$

где I — ток (A), ω_0 — число витков/ $см$, B — магнитная индукция, S — поперечное сечение магнита (в данном случае стержня соленоида), μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, μ — относительная магнитная проницаемость.

Подставив формулы (1) и (2) в (3), получим выражение для тянувшей силы соленоида

$$F = \frac{\pi}{4} (\mu d\omega_0 I)^2, \quad (4)$$

где d — диаметр стержня соленоида.

Поскольку перед нагружением образца магнитным полем к его концу всегда прикрепляется ферромагнитный грузик с начальным весом P_0 , то целесообразно формулу (4) представить в виде:

$$F = P_0 + \frac{\pi}{4} \mu^2 d^2 \omega_0^2 I^2 \quad (5)$$

Формула (5) отражает тот факт, что при $I = 0$, сила, действующая на образец, определяется весом начального грузика P_0 ; $F = P_0$. В связи с этим надо стремиться к тому, чтобы начальный вес грузика не превышал 1–2% от разрывной нагрузки образца во избежание искажения характера кривой упругого последействия (выключение тока соленоида — снятие нагрузки).

Из формулы (5) следует, что тянувшее усилие зависит от числа ампер-витков на $см$ диаметра стержня соленоида и магнитной проницаемости грузика.

Градуировка соленоида заключается в установлении зависимости между силой магнитного поля F (тянувшее усилие) и величиной тока в соленоиде. Первый этап состоит в градуировке обратимо-упругого элемента, например стальной пружины. Верхний конец пружины закрепляют неподвижно, а к нижнему прикрепляют грузы разного веса, которые, естественно, вызывают различную обратимую деформацию пружины. Полученная прямолинейная зависимость $e = f(P)$ дает возможность судить о величине нагрузки на пружину по ее деформации. Второй этап состоит в градуировке ферромагнитного грузика данного начального веса P_0 . Грузик прикрепляется к пружине и помещается в отверстие соленоида. С увеличением тока в соленоиде тянувшее усилие возрастает, и пружина растягивается. В результате мы получаем зависимость $e = f(I)$, которая дает возможность, зная $e = f(P)$, установить соответствие величин тока в амперах и нагрузки в граммах, т. е. получить $F = f(I)$. Для ферромагнитных грузиков с начальными весами P_{01} , P_{02} , ..., P_{0n} , получено семейство кривых $F_1 = f_{01}(I)$; $F_2 = f_{02}(I)$, ..., $F_n = f_{0n}(I)$.

Для градуировки были выбраны грузики разного начального веса из различных ферромагнитных материалов, например электротехнической стали ЭА, Э41, железо-никелевых сплавов 79НМ и 80НХС, а также из магнитной стали АРМКО [6].

На рис. 2 видны две группы кривых. Одна группа (1–5) снята на соленоиде с параметром $\omega_0 = 244$ витка/ $см$ для грузиков из различных ферромагнитных материалов. Наиболее эффективными оказались массивные грузики из АРМКО. Другая группа (6–9) получена на соленоиде с параметром $\omega_0 = 480$ витков/ $см$ для грузиков из АРМКО разного начального веса. Кривые показывают, что с увеличением начального веса грузика растет максимальная нагрузка. Как и следовало ожидать, увеличение числа витков на сантиметр приводит к тому, что максимальная нагрузка достигается для данного грузика при меньшем токе. Например, в соленоиде с $\omega_0 = 244$ витка/ $см$ (грузик 6,4 г) из АРМКО развивает при токе 2,15 A усилие 95 г, тогда как тот же грузик, но в соленоиде с $\omega_0 = 480$ витков/ $см$, развивает такое же усилие при токе 1,5 A .

Ампула с испытуемым образцом. Испытуемый образец 3 (рис. 1) помещается в ампулу 17, имеющую в верхней части кран-шильф 18 с вводами 19 и 20. Вводы 19 служат для электрических контактов печки 21, а 20 для присоединения термопары 22. Кран-шильф имеет крючок 23 для прикрепления образца. К другому концу образца прикрепляется диск 8, ферромагнитный грузик 8а. В нижнюю часть ампулы 24 наливают кислоту. С помощью винтов 26 ампула может перемещаться вверх и вниз в держателе 25.

Для поддержания в ампуле относительной влажности в пределах 60–67% при 22–27° в нижнюю часть наливали 35%-ный водный раствор серной кислоты [7]. Температура в ампуле контролируется медью-константановой термопарой с чувствительностью = 0,70 $мк/град$. Запись показаний термопары можно производить на самописце Н371-1.

Фотоэлектронная следящая система и электрическая схема управления релаксографом. В электромагнитном релаксографе с целью автоматизации процесса наблюдения и записи деформации образца применена фотоэлектрическая следящая система. Фотосопротивление ФС-К1 включено в мостовую схему (рис. 3), образованную сопротивлениями R_1 , R_2 и R_3 . При затемненном фотосопротивлении мост балансируется переменным сопротивлением R_4 (чувствительность). Когда свет падает на фотосопротивление, в диагонали моста возникает напряжение, которое после уси-

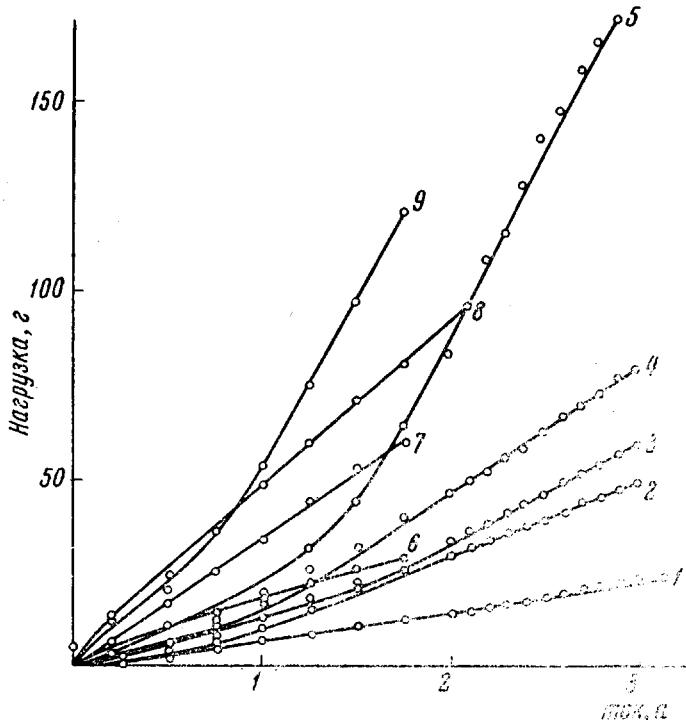


Рис. 2. Градуировочные кривые:

1, 2 — грузик из стали 79НМ (набран из пластинок) 5,7 и 12,2 г; 3, 4 — грузик из стали Э-41 5,8 и 6 г; 5 — грузик из АРМКО 6,4 г; 6—9 — грузик из АРМКО 1, 2, 3 и 6,4 г

ления в балансном усилителе постоянного тока на двойном триоде λ_1 (6Н15П) подается на сетку тиристрона λ_2 ($TG1 = 0,1$) [1, 3]. Реле P в анодной цепи тиристрона при этом срабатывает и включает исполнительный механизм. Сопротивление R_5 предохраняет усилитель от перегрузок, а конденсатор C_3 — от ложных срабатываний реле. Величина переменного сопротивления R_2 подбирается опытным путем и должна обеспечивать минимальное время срабатывания реле.

Электрическая схема управления релаксографом работает следующим образом. При освещении фотосопротивления срабатывание реле приводит к подаче напряжения на обмотку OA (замыкание контактов 1, 2) исполнительного механизма и опусканию соленоида. Одновременно с этим замыкаются контакты 5, 6 и 7, 8 (питание соленоида). Контакты 3, 4 в этот момент разомкнуты. Через заданный нами промежуток времени PB замыкает контакт $1p$, что приводит к срабатыванию реле P , разрывающего цепь питания обмотки OA и контакты 5, 6 и 7, 8, отключая тем самым выпрямитель от соленоида (разгрузка). В это же время замыкаются контакты 3, 4 (питание обмотки OB), обеспечивающие реверсивное движение соленоида. Таким образом, после переключения исполнительный механизм будет поднимать соленоид.

Процесс наблюдения фотоэлектронной системой за деформацией образца осуществляется следующим образом. Перед началом деформации (схема I на рис. 4) луч от осветителя 1 заслоняется щитком 2, который проектируется на фотосопротивление 3. При включении тока (схема II на рис. 4) грузик втягивается внутрь соленоида и вызывает удлинение образца l на величину Δl . Щиток, плотно прикрепленный к образцу, опускается вниз, и луч попадает на фотосопротивление. Соленоид опускается до тех пор, пока луч от осветителя, который закреплен на соленоиде, не пересечется щитком (схема III на рис. 4). Фотосопротивление затемняется, и соленоид прекращает движение. Если образец продолжает деформироваться, то описанный цикл повторяется. После разгрузки фиксирование изменений размеров образца следящей системой осуществляется в обратном направлении. Образец в ре-

зультате упругого последействия сокращается, увлекая за собой диск. Фотосопротивление освещается. Исполнительный механизм поднимает соленоид до тех пор, пока диск не пересечет луч. Таким образом, в процессе испытания характер деформации образца во времени повторяется перемещением соленоида, которое фиксируется посредством потенциометра на самописце в виде релаксограммы.

В связи с особенностью работы фотоэлектронной следящей системы фиксирование деформации образца происходит скачками. О том, насколько чувствительна сле-

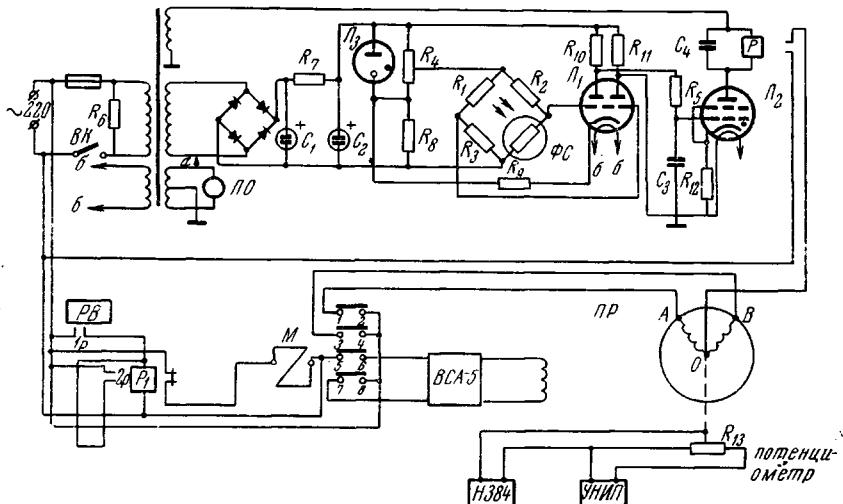


Рис. 3. Принципиальная схема управления релаксографом

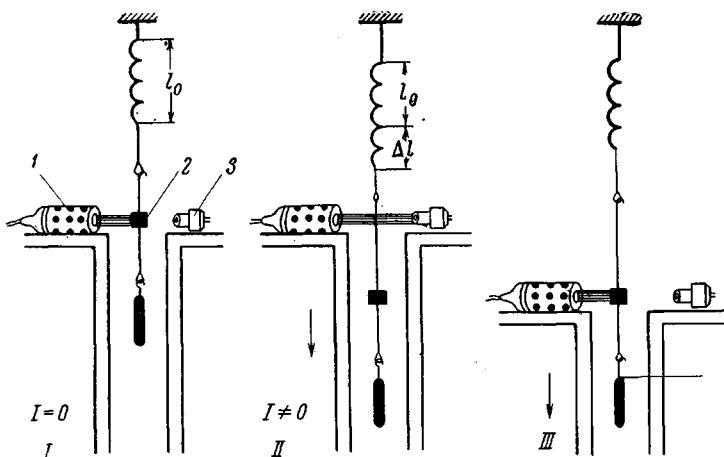


Рис. 4. Принцип действия фотоэлектронной следящей системы

дящая система, можно судить по величине и числу скачков на релаксограмме. В этой связи для выявления оптимального диапазона чувствительности прибора были сняты релаксограммы образцов капрома при десяти различных положениях сопротивления R_4 с десятикратной повторностью на каждой чувствительности. Для каждой релаксограммы подсчитывалось число скачков как в нагружочной, так и в разгрузочной части кривой и вычислялось среднее число скачков для данной чувствительности.

На рис. 5, а представлена зависимость среднего числа $n_{ср}$ скачков (кривая 1) и средней величины скачка ΔS (кривая 2) от положения индикатора чувствительности для разгрузочной части релаксограмм. Максимальное число скачков падает на чувствительность 10. Однако следует отметить, что число скачков не может полностью характеризовать чувствительность системы, а скорее дает представление о способности образца к деформации. Правильнее оценить чувствительность системы

можно по величине скачка. Измерение величины скачков на релаксограммах производилось под микроскопом ($\times 24$). Отсчет осуществлялся по шкале окулярного микрометра.

Истинную величину скачка в $мм$ подсчитывали после перемножения результата отсчета по шкале микрометра на коэффициент K (например, при положении переключателя самописца на 15 в $K = 0,35$).

Наименьшее значение скачка наблюдается в диапазоне чувствительности 40–60. Следовательно, измерения на релаксометре целесообразно проводить в указанном диапазоне чувствительности.

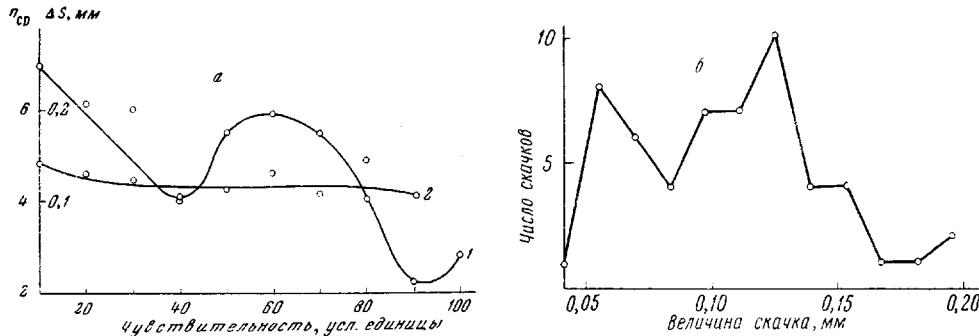


Рис. 5. а — Зависимость среднего числа скачков (1) и средней величины скачка (2) от положения индикатора чувствительности; б — распределение числа скачков по величине при чувствительности 50.

Рассмотрим в качестве примера распределение числа скачков по величине при чувствительности 50 (рис. 5, б). Видно, что система способна заметить изменение деформации образца величиной 0,042 $мм$ (точность измерения величины скачка 0,0014 $мм$), т. е. зафиксировать деформацию упругого последействия с точностью до 0,05 $мм$.

Приведенные выше зависимости (рис. 5, а) получены в результате обработки релаксограмм упругого последействия образцов (разгрузочная часть кривой). В результате обработки нагружочной части релаксограмм получены аналогичные кривые, но точки имеют несколько больший разброс по сравнению с кривыми на рис. 5, а. Причина такого разброса связана с инерционностью соленоида при его движении вниз. Инерция соленоида приводит к появлению систематической ошибки (ΔS) при отсчете деформации в процессе нагружения образца. Величину ΔS легко выявить в результате следующего эксперимента. Движение соленоида вверх происходит практически безинерционно вследствие большого веса соленоида. Если произвести несколько подъемов и опусканий соленоида через равные промежутки времени, то разность в расстояниях, пройденном соленоидом вниз и вверх, позволит найти величину перемещения соленоида вниз по инерции после выключения реле. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Необходимо отметить, что величину систематической ошибки можно уменьшить, используя соленоид небольшого веса.

Выбор скорости движения следящей системы. В работах [8, 9] и др. показано, что суммарная деформация твердого тела ε имеет три составляющие: упругую ε , обратимую в фазе с напряжением σ ; высокоэластическую ε^* , обратимую, но не в фазе с напряжением, и остаточную деформацию ε_0 , полностью необратимую.

Разделение суммарной деформации образца (ε) на ее составляющие ($\varepsilon, \varepsilon^*, \varepsilon_0$) удобнее всего производить при измерении релаксации деформации. Как правило, упругая часть измеряется сразу же после разгрузки. Точность отсчета упругой де-

Таблица 1
Величины перемещения соленоида

Время движения соленоида, сек	Величина перемещения соленоида при движении вниз, $мм$	Систематическая ошибка $\Delta S, мм$	Время движения соленоида, сек	Величина перемещения соленоида при движении вниз, $мм$	Систематическая ошибка $\Delta S, мм$
3	2,25	0,30	10	7,50	0,40
5	3,75	0,30	12	9,00	0,65
8	6,00	0,50	15	11,25	0,85

формации будет зависеть от скорости следящей системы. Поскольку упругая деформация распространяется в твердом теле со скоростью звуковых колебаний, то в идеальном случае для определения истинно упругой деформации скорость следящей системы должна быть равна скорости распространения звуковых колебаний в данном образце.

Приведем значения скорости распространения звука [10] для некоторых полимерных образцов при частоте 10 кгц (табл. 2).

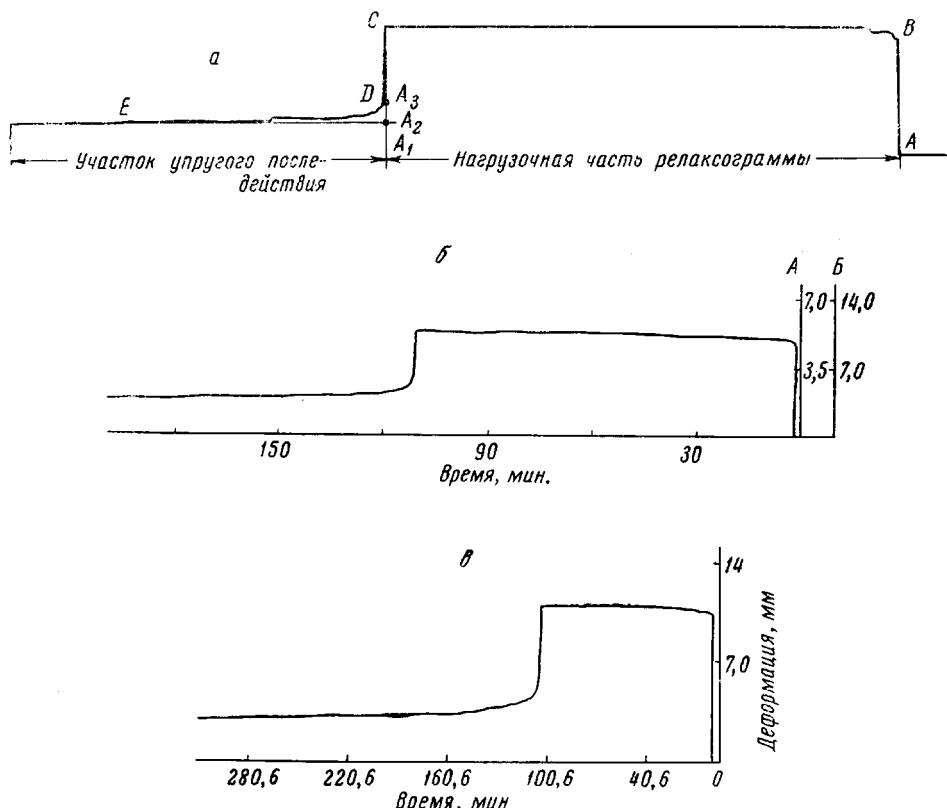


Рис. 6. а — Релаксограмма образца 1 капрона, б — то же для образца 2 (А — деформация, %; Б — деформация, мм); в — то же для образца 3

Пользуясь данными табл. 2, определим время, необходимое для развития истинно упругой деформации образца найлона. Будем считать приближенно, что при нагрузке 25% от разрывного усилия упругая деформация составляет 2,5% от исходной длины образца ($l_0 = 200$ мм), т. е. $e = 5$ мм. Время отсчета определяется $t = e / V_c = 5 \cdot 10^{-6} / 1,3 = 3,8 \cdot 10^{-6}$ сек. В релаксометрах, применяемых на практике, отсчет времени развития деформации после разгрузки производится визуально и длится 3—5 сек. В самом лучшем случае, если даже удастся сделать отсчет в течение одной секунды, то это время на шесть порядков превысит время развития истинно упругой деформации. Поэтому все существующие релаксометры позволяют определить не

Таблица 2

Скорость распространения звука в некоторых полимерах

Полимер	Скорость звука, км/сек		Полимер	Скорость звука, км/сек	
	пленка	волокно		пленка	волокно
Дакрон	1,4	1,4	Вискозный	—	2,0
Найлон 66	1,3	1,3	шелк	—	2,1
Орлон					

истинно упругую деформацию, а условно-упругую, которая кроме истинно упругой включает в себя выскоэластическую. В этой связи не имеет принципиального значения (в пределах нескольких секунд) определение времени отсчета условно-упругой деформации. Для стандартизации отсчета условно-упругой деформации образцов важно установить одну вполне определенную скорость движения следящей системы. Мы предлагаем скорость следящей системы, равную 1—0,75 мм/сек, развивающую исполнительным механизмом ПР-1. Такая скорость, как будет показано ниже, позволяет удовлетворительно фиксировать процесс упругого последействия полимерных образцов.

Методика измерений на релаксографе. В качестве объектов исследования были взяты образцы капроновых нитей, поливинилхлоридные (ПВХ) пленки и пленки полиэтилена высокого давления марки 20-20-А. Образцы подклеивали к диамагнитным пластиночкам (26, рис. 1) kleem БФ-2 на расстояние 20 см (для образцов капрона и полиэтилена) и 10 см (для ПВХ) и сушили в течение 6 дней. После погружения образца с прикрепленным к его концу диском 8 (рис. 1) в ферромагнитным грузиком 8а в ампулу производили юстировку луча осветителя, для чего соленоид поднимали в крайнее верхнее положение; включали осветитель 4 (рис. 1) и ампулу с помощью винтов 27 перемещали вверх или вниз до тех пор, пока диск не закрывал луч света (фотосопротивление затемнило). Часовому механизму задали определенное время нагружения образца и устанавливали требуемую чувствительность. После этих основных подготовительных операций прибор готов к работе. Включение прибора производится подачей тока в соленоид. Дальнейший процесс испытания и запись результатов происходят автоматически.

Обработка релаксограмм и результаты измерений. На рис. 6, а представлена типичная релаксограмма деформации образца 1 капроновой нити. Отметим, что в связи с особенностью движения бумаги самописца релаксограммы надо читать не слева направо, как обычно, а справа налево. На релаксограмме четко видны участки ABCDE. Участок AB описывает процесс деформации образца сразу после нагружения, BC — релаксация деформации под действием постоянной нагрузки 25% от разрывной (начальный вес грузика 2% от разрывного), CD — упругое сокращение образца после снятия нагрузки, DE — участок упругого последействия. Полная деформация определяется отрезком CA, условно-упругая — CA₃, выскоэластическая — отрезком A₃A₂ и условно-пластическая A₂A₁.

Определим составные части деформации на примере образцов капрона 1 и 2 (рис. 6, б) с учетом систематической ошибки. Условия испытания: нагрузка 25% от разрывной, чувствительность 20, скорость движения бумаги самописца 1 мм/мин, запись на пределе 15 в (самописец 384-1). Данные представлены в табл. 3.

Таблица 3
Деформация и ее составляющие образцов 1 и 2 капрона

Образец, №	Тип деформации							
	полная		условно-упругая		высокоэластич-ская		условно-пласти-ческая	
	мм	% к за- жимной длине	мм	% от полней	мм	% от полней	мм	% от полней
1	10,09	5,04	6,30	62,41	1,75	17,34	2,04	20,22
2	9,60	4,80	4,55	47,40	2,45	25,52	2,60	27,08

На рис. 6, в представлена релаксограмма образца 3, записанная на скорости 0,33 мм/мин. Форма релаксограммы, особенно в ее разгрузочной части, близка к форме, характерной для кривых релаксации деформации полимерных образцов. Очевидно, скорость 0,33 мм/мин наиболее приемлема.

Несколько иную форму имеют релаксограммы полимерных пленок, особенно в нагружочной части кривой.

Выводы

Предложен прибор — электромагнитный релаксограф, предназначенный для изучения релаксации деформации полимерных волокон нитей и пленок в режиме нагрузка — разгрузка — отдых. Прибор позволяет автоматически записывать релаксограммы в заданном нагруженно-временном режиме. Фотоэлектронная система прибора способна фиксировать деформацию упругого последействия образца с точностью до 0,05 мм. Прибор позволяет проводить испытание образцов при повышенных температурах.

Научно-исследовательский институт
текстильной промышленности

Поступила в редакцию
2 XII 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Н. Кукин, А. Н. Соловьев, Текстильное материаловедение, изд-во Легкая индустрия, 1964.
2. Х. У. Усманов, В. А. Каргин, Химия и физико-химия высокомолекулярных соединений, Изд-во АН СССР, 1952.
3. В. Т. Фаерман, Авт. свид. 133 252, Бюлл. изобретений, 1960, № 21.
4. С. Э. Фриш, А. В. Тиморева, Курс общей физики, том II, ГИТТЛ, 1957.
5. А. Е. Каплянский, А. П. Лысенко, Л. С. Полотовский, Теоретические основы электротехники, Госэнергоиздат, 1961.
6. Справочник по электротехническим материалам. Госэнергоиздат, 1960.
7. Справочник по аналитическому контролю в производстве искусственных и синтетических волокон, Гизлегпром, 1957.
8. А. П. Александров, С. Н. Журков, Явление хрупкого разрыва, ГИТТИ, 1933.
9. В. А. Каргин, Г. Л. Слонимский, Краткий очерк по физико-химии полимеров, Изд-во Моск. гос. ун-та, 1960.
10. W. W. Moseley, J. Appl. Polymer Sci., 3, 266, 1960.

ELECTROMAGNETIC RELAXOMETER (RELAXOGRAPH RF-1)

V. T. Faerman, V. V. Korzin, V. V. Dronntkov

Summary

Automatic electromagnetic relaxograph for study of relaxion of deformation of polymer fibers and films in regime of «loading — unloading — rest» is proposed. It consists of mechanical blocks, ampule with studied specimen, solenoid, servo-mechanism for solenoid movement, photoelectronic watching device, time relay and recorder. Loading of the sample is achieved by magnetic field of solenoid acting on ferromagnetic load attached to the specimen. Recorder follows deformation curve in time.
