

О МЕХАНИЗМЕ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ СВОБОДНЫХ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕННЫХ КОМПЛЕКСНЫХ НИТЕЙ

Е.Н. ПЕРЕВОЗНИКОВ, А.С. ГОРШКОВ

(Санкт-Петербургский торгово-экономический институт)

Исследование упруго-релаксационных свойств высокоориентированных полимеров в виде комплексных нитей различной гибкости цепей (СВМ, ПЭТФ, терлон, армос) проводилось методом свободных продольных колебаний в сочетании с ползучестью под действием неразрушающей постоянной нагрузки.

В работе изучены особенности появления и исчезновения амплитудно-модулированных колебаний в ограничен-

ной области начальной стадии деформирования [1], различной для нитей различного химического строения. Вне этой области наблюдаются классические экспоненциально затухающие колебания без модуляции.

В явном виде выражение для динамической части деформации в случае амплитудных модуляций свободных колебаний может быть представлено в виде [2]:

$$\varepsilon_d(t) = C_0 \exp(-\beta_0 t) + C_1 \exp(-\beta_1 t) \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + C_2 \exp(-\beta_2 t) \sin(\omega_2 t + \varphi_2). \quad (1)$$

Необходимо отметить, что амплитудно-модулированные колебания наблюдаются у всех исследованных объектов ниже их температур стеклования. При температуре стеклования явление амплитудных модуляций скачкообразно исчезает во всем интервале напряжений. Кроме того, при тех же условиях проведения эксперимента явление амплитудных модуляций не наблюдается у ряда синтетических нитей, температуры стеклования которых находятся ниже температуры, при которой производится эксперимент (например, у полипропилена, полиэтилена).

Анализ экспериментальных данных, включая контрольные испытания с изменениями конструкции экспериментальной установки, варьированием параметров этой установки, а также расчеты по выявлению внешних (инструментальных) причин возникновения амплитудно-модулированных колебаний, позволяет предполагать, что причина этого явления заключается в специфике строения исследованных ориентированных аморфно-кристаллических полимеров. Данное предположение подтверждается тем, что амплитудно-модулированные колебания не наблюдаются при тех же значениях частот у пружин с подобранным коэффициентом жесткости и металлических проволок.

Особенности строения высокомолекулярных соединений, имеющих анизотропную и гетерогенную структуру, основные элементы которой взаимодействуют на межмолекулярном и надмолекулярном уровнях, приводят к специфике свойств, которых у низкомолекулярных твердых тел в данных условиях проведения эксперимента не наблюдается.

Сформулированное предположение подтверждается также тем, что в области деформаций, где наблюдается явление амплитудных модуляций, в значениях механических потерь и динамического модуля упругости, обнаруживается ряд особенностей: тангенс угла механических потерь имеет острый максимум, а динамический

модуль упругости дважды меняет свою монотонность, в то время как вне этого интервала возрастает строго монотонно (рис. 1 – зависимость тангенса угла механических потерь $\text{tg } \delta$ (а) и динамического модуля упругости $E_{\text{дин}}$ (б) от деформации для нити СВМ (29,4 текс) при $T=293 \text{ K}$).

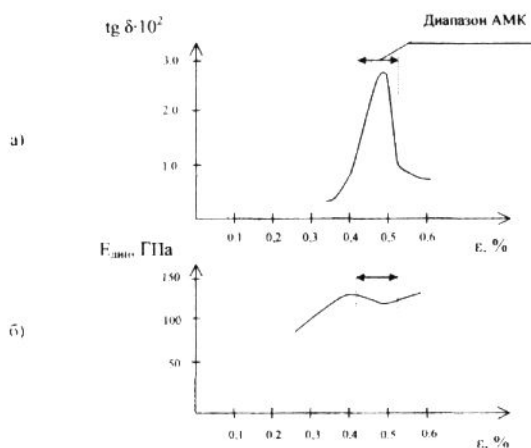


Рис. 1

Отметим, что с точки зрения современных представлений о кинетике деформационных процессов попытки объяснения данного явления вызывают некоторые трудности. Например, явление амплитудных модуляций при свободных колебаниях синтетических нитей невозможно описать ни одной из известных классических моделей вязкоупругого твердого тела.

Полученные экспериментальные данные могут быть описаны с помощью обобщенной теории переноса [3], в которой моделирование релаксационных процессов в высокоориентированных полимерах рассматривается в виде процессов рассеяния потока импульса по взаимосвязанным каналам, моделирующим группы различных молекулярных цепей.

Двухканальная модель ориентированного полимера, в которой под двумя каналами понимаются аморфные и кристаллические области, по которым рассеивается импульс, приводит к следующему виду релаксационного модуля [4]:

$$E_r(t, k) = \Delta E \sum_{\alpha=1}^3 \chi_{\alpha}(z_{\alpha}, k) \exp(z_{\alpha} t) + E_{\infty}, \quad (2)$$

где $\Delta E = E_{\infty} - E_0$ – разность между равновесным E_{∞} и начальным E_0 модулями упругости, получаемыми из анализа кривых релаксации напряжения; χ_{α} – коэффициенты разложения; z_{α} – корни спектрального уравнения, зависящие от градиентов, параметров модели, которые в свою очередь определяются структурой и состоянием ориентированного полимера; k – параметр преобразования Фурье, характеризующий неоднородность.

Производная релаксационного модуля играет роль наследственного релаксационного ядра, зависящего от градиентов параметров модели и неявно, через них, от степени деформирования полимера:

$$\text{Re}[E_r(k, t)] = E_{\infty} + \Delta E (\chi_1 \exp(-\gamma_1 t) + \chi_2 \exp(-\gamma_2 t) \cos(\varpi_2 t + \alpha_2)), \quad (4)$$

где $\tau_{\alpha} = \frac{1}{\text{Re}(z_{\alpha})}$ – время релаксации;

$$\gamma_{\alpha} = \text{Re } z_{\alpha}.$$

$$r(t) = \Delta E [\chi_1 \exp(-\gamma_1 t) + \chi_2 \exp(-\gamma_2 t) \cos(\varpi_2 t + \varphi_{20})]. \quad (5)$$

Таким образом, рассматриваемая на основе обобщенной теории переноса модель ориентированного полимера приводит при определенных условиях к возникновению ядра релаксации осциллирующего типа, то есть к возникновению внутренней виброрелаксации, механизмы которой хорошо известны в гидро- и газодинамике.

Как показано в [2], наличие осциллирующего ядра релаксации является необходимым и достаточным условием возникновения сложной формы колебательного процесса, в том числе наблюдаемого явления амплитудных модуляций. Отметим, что, по-видимому, впервые возможность существования осциллирующего

$$\frac{\partial E_r(t)}{\partial t} = r(t) = \Delta E \sum_{(\alpha)} z_{\alpha} \chi_{\alpha} \exp(z_{\alpha} t). \quad (3)$$

Таким образом, временная зависимость релаксационного ядра определяется корнями спектрального уравнения z_{α} . При малых градиентах ($k \ll 1$) спектральное уравнение имеет три вещественных отрицательных корня, имеющих смысл обратных времен релаксации. Релаксационный модуль и ядро имеют в этом случае экспоненциально затухающий вид. С ростом градиентов в спектральном уравнении возникают комплексно-сопряженные корни $z_{\alpha} = -\gamma_{\alpha} \pm i\varpi_{\alpha}$, а в релаксационном ядре появляется затухающий осциллирующий вклад:

Для динамического ядра релаксации соответственно получаем:

ядра релаксации отмечена в работах Ю.Н. Работнова [5].

ВЫВОДЫ

Согласно математической модели релаксационных процессов [3], [4] внутренняя виброрелаксация, порождаемая неоднородностью и неравновесностью процесса рассеяния потока импульса по различным молекулярным цепям, является причиной возникновения в ограниченной области деформирования ориентированных полимеров амплитудно-модулированных колебаний.

Амплитудные модуляции проявляются, когда частоты свободных колебаний нитей близки к частоте колебаний осциллирующей части релаксационного ядра.

С экспериментальной точки зрения явление амплитудных модуляций можно использовать для изучения механизма внутренней виброрелаксации и определения ее характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горшков А.С. и др. Физико-химия полимеров // Сб. научн. тр. Синтез, свойства и применение. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2003. Вып. 9. С. 60...64.
2. Романова А.А. Математическое моделирование деформационных свойств синтетических нитей

при динамическом нагружении: Дис.... канд. техн. наук. – Л., 1990.

3. Сталевич А.М., Рымкевич П.П., Первозников Е.Н. // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 1992. №1. С. 27...34.

4. Анолик М.В., Костина А.А., Первозников Е.Н. Методы граничных и конечных элементов в механике деформируемых тел и конструкций // Сб. научн. тр. XXVII Междунар. конф. – СПб, 1999.

5. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Наука, 1988.

Рекомендована кафедрой физики. Поступила 27.09.04.