

Спектры скоростей малых деформаций твердых тел

© Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев, В.В. Шпейзман, А.Б. Синани, В.А. Берштейн

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: yak@pav.ioffe.rssi.ru

Для обнаружения релаксационных переходов в твердых телах применен метод построения температурных зависимостей скоростей малых деформаций ползучести (спектров скоростей). Метод основан на прецизионном измерении скорости с помощью лазерного интерферометра и отличается высокой разрешающей способностью. Показана возможность использования спектров для прогнозирования критических температур в кинетике разрушения полимеров и металлов, а также в изменении электрических свойств (на примере сверхпроводящего перехода в Y-Ba-Cu-O керамиках).

Изучение кинетики деформации в связи с молекулярной динамикой и структурой вещества [1–3] является одной из основных задач физики прочности и пластичности. Наиболее выразительно деформационные способности материала отражаются в ползучести. Деформация ползучести развивается при постоянных внешних параметрах (напряжении и температуре) и служит примером самоорганизации структуры. Главной характеристикой любого процесса, в том числе ползучести, является скорость, от точности измерения которой зависит достоверность результатов. Кинетика ползучести традиционно изучается по средним скоростям ее стационарной стадии, что ограничивает круг возможных исследований. Для более точного измерения скорости на малых приращениях деформации в любой "точке" процесса была создана принципиально новая для статических испытаний регистрационная схема на основе лазерного интерферометра [4]. Прецизионная методика позволила применить новые подходы к изучению кинетики ползучести и получить неизвестные ранее закономерности, в частности спектральные температурные зависимости скоростей малых неупругих деформаций [5–13]. Основные исследования посвящены полимерам [5–8, 12], но аналогичные закономерности получены и для металлов и керамик [9–11, 13]. Рассмотрим возможности метода спектров скоростей ползучести (ССП) в плане прогнозирования температур, критических для различных свойств материала.

1. Экспериментальная методика

Спектры скоростей можно получать при разных видах нагружения; в данной работе применялось одноосное сжатие. В [6,7,12] приводится схема нагружающего устройства и регистрирующей части установки, включающей интерферометр Майкельсона на основе лазера малой мощности с длиной волны $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$. Скорость деформации $\dot{\epsilon}$ определяется частотой ν биений интенсивности интерферирующих лучей (исходного и с измененной вследствие доплеровского сдвига частотой): $\dot{\epsilon} = \lambda\nu/2l_0$, где l_0 — длина образца. Наименьшая деформация, на базе которой можно определить $\dot{\epsilon}$ с погрешностью $\sim 1\%$, составляет $0.15 \mu\text{m}$ (полови-

ну биения на интерферограмме). Методика построения спектра состоит в следующем: образец охлаждается до самой низкой температуры исследуемого интервала, нагружается до малых напряжений, равных 0.1–0.3 предела текучести при наиболее высокой температуре, и после записи деформации $\epsilon = (1-3)10^{-4}$ образец разгружается, нагревается на (3–10) К, нагружается той же нагрузкой и т.д. Измерение скорости при всех температурах производится при одном и том же времени ползучести по половине биения, приходящегося на момент измерения. Полученные таким образом зависимости $\dot{\epsilon}$ от T имеют вид спектров с максимумами, указывающими на изменения в подвижности структуры. Корреляционная частота опыта для времени ползучести 10–30 с равна примерно 10^{-2} Hz.

2. Результаты и их обсуждение

Установленные ранее аномалии температурных зависимостей механических характеристик были объяснены существованием релаксационных переходов, изменяющих деформационную способность, т.е. степень хрупкости (пластичности) материала [2,3,7]. Спектры скоростей дают более полную информацию о температурах, критических для различных физико-механических свойств, по сравнению с другими известными методами, например, методом внутреннего трения (ВТ). Возможности метода ССП были использованы при исследовании полимеров разных классов, металлов и сплавов, керамик, в том числе сверхпроводящих, и др. Рассмотрим несколько примеров.

2.1. Полимеры. На рис. 1 приведены температурные зависимости скоростей микроползучести и разрушающих напряжений, а также спектры ВТ для полистирола (ПС). На спектре скоростей отчетливо видны четыре пика, определяющие релаксационные переходы. Две низкотемпературные области релаксации более точно, чем слабовыраженные релаксации спектра ВТ, соответствуют изломам на температурной зависимости прочности. Вблизи 320 К прочность ПС очень мала и в области размягчения не измерялась. Аналогичные корреляции были получены и на других полимерах [5–8].

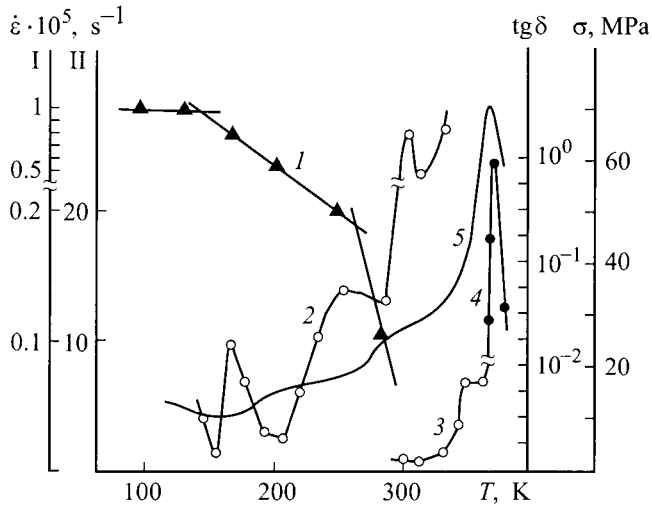


Рис. 1. Полистирол. Температурные зависимости разрушающих напряжений σ (1), скоростей ползучести $\dot{\epsilon}$ ($\sigma = 10$ МПа, 2 — шкала I и 3 — шкала II; $\sigma = 0.5$ МПа, 4 — шкала II), спектр ВТ [14], $tg \delta$, 1 Hz (5).

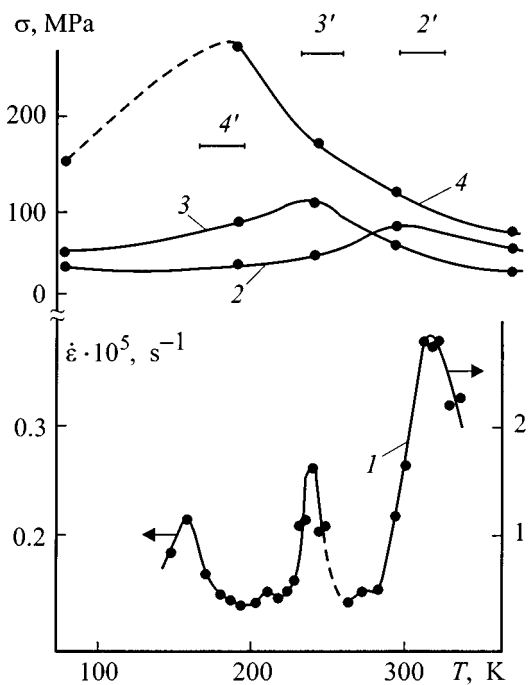


Рис. 2. Цинк. Температурные зависимости скорости деформации при $\sigma = 50$ МПа (1), разрушающих напряжений при растяжении (2), кручении (3), сжатии для $T < 200$ К (4), напряжений течения для сжатия при $T > 200$ К (4'). Области вязко-хрупкого перехода при растяжении (2'), кручении (3'), сжатии (4').

2.2. Металлы. В качестве примера на рис. 2 приведены данные для цинка. ССП имеет три пика, совпадающих с изломами температурных зависимостей прочности при разных видах напряженного состояния. Изломы на этих кривых соответствуют областям вязко-хрупкого

перехода [9]. Следовательно, температура хрупкости изменяется не произвольно, а тяготеет к близлежащему пику на ССП. Подобные данные были получены и на полимерах [7]. Таким образом, ССП можно использовать для прогнозирования температур хрупкости при изменении условий нагружения, что является важным для практики результатом. Изломы температурных зависимостей прочности рассмотрены в [2], где предложена физическая модель хрупкого разрушения, учитывающая роль локальных деформаций. Быстрозатухающие малые неупругие деформации, о которых говорится в работе, обеспечиваются локальными сдвигами, распределенными в упругой матрице. Немонотонность является общей чертой температурных зависимостей скорости локальных деформаций для тел разных классов, а высокое разрешение метода позволяет исследовать даже предельно хрупкие материалы, в которых макроскопическая пластичность не развивается [10–14].

2.3. Сверхпроводящие керамики. Исследования керамик Y–Ba–Cu–O проведено на образцах с разной величиной зерна и с разным содержанием кислорода [10, 11]. В интервале от 77 до 300 К на ССП обычно наблюдается три пика, один из которых соответствует температуре сверхпроводящего перехода $T_c \approx 90$ К. На рис. 3 спектр 1 получен на мелкозернистой керамике, спектры 2 и 3 — на однофазных крупнозернистых керамиках разной плотности, спектр 4 — на многофазной крупнозернистой керамике. Для всех ке-

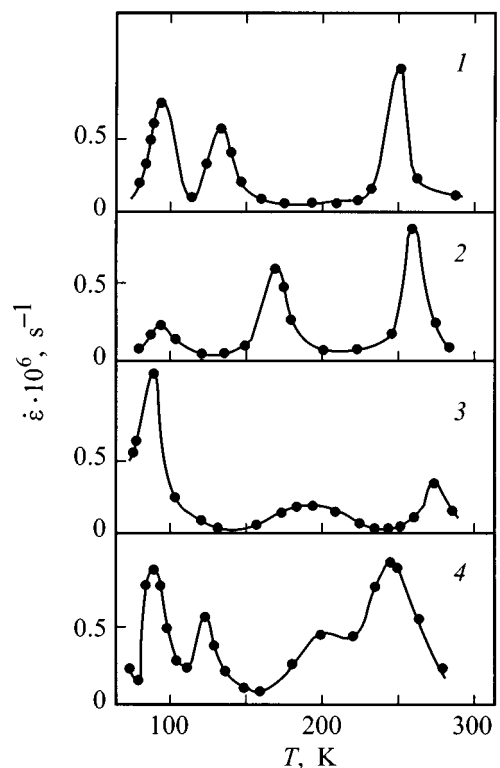


Рис. 3. Спектры скоростей неупругих деформаций при сжатии Y–Ba–Cu–O керамик, $\sigma = 10$ МПа. Размер зерна, μm : 1–3 (1), 10–30 (2–4).

рамик пик вблизи T_c наиболее стабилен, тогда как положение других пиков зависит от структуры. Указанный результат свидетельствует о влиянии электронного состояния на скорость малых неупругих деформаций, что также было подтверждено путем разрушения СП состояния не температурой, а магнитным полем или электрическим током [15]. На керамиках с разным содержанием кислорода показано, что пик скорости может сохраняться и в том случае, когда СП переход исчезает при уменьшении концентрации кислорода [11]. Эффект объясняется неравномерным распределением кислорода, т.е. спектр скоростей обнаруживает способные к СП переходу неоднородности микроструктуры даже тогда, когда образец в целом не проявляет СП свойств.

Следовательно, спектры скоростей малых неупругих деформаций отражают температурные изменения подвижности молекулярной (или кристаллической) структуры и могут использоваться как самостоятельный метод спектроскопии для определения температурных низкочастотных областей релаксации в твердых телах разной природы. Спектры скоростей являются удобным и высокоразрешающим методом определения критических температур наиболее резкого изменения физико-механических характеристик полимеров, металлов, керамик.

Список литературы

- [1] R.F. Boyer. *Polymer Eng. Sci.* **8**, 3, 161 (1968).
- [2] В.А. Степанов, Н.Н. Песчанская, В.В. Шпейзман. Прочность и релаксационные явления в твердых телах. Наука, Л. (1984). 245 с.
- [3] А.Б. Синани, В.А. Степанов. *Механика композит. материалов* **1**, 109 (1981).
- [4] Н.Н. Песчанская, Г.С. Пугачев, П.Н. Якушев. *Механика полимеров* **2**, 357 (1977).
- [5] Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев, В.А. Степанов. *ФТТ* **26**, **4**, 1202 (1984).
- [6] Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев, Ю. Христова, А. Топлийска. *Высокомолекуляр. соединения* **35**, **9**, 1493 (1993).
- [7] N.N. Peschanskaya, P.N. Yakushev, A.V. Sinani, V.A. Bershtein. *Thermochim. Acta* **238**, 429 (1994).
- [8] Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев, В.Ю. Суровова. *ФТТ* **37**, **9**, 2602 (1995).
- [9] В.В. Шпейзман, Н.Н. Песчанская. В кн.: "Физические аспекты прогнозирования разрушения и деформирования гетерогенных материалов". Л. (1987). С. 166.
- [10] Н.Н. Песчанская, Б.И. Смирнов, Ю.П. Степанов, В.В. Шпейзман, П.Н. Якушев. *ФТТ* **31**, **4**, 271 (1989).
- [11] В.В. Шпейзман, Н.Н. Песчанская, Б.И. Смирнов, Ю.П. Степанов. *ФТТ* **31**, **12**, 105 (1989).
- [12] N.N. Peschanskaya, P.N. Yakushev, A.V. Sinani, V.A. Bershtein. *Macromol. Symp. Lyon* **119**, 79 (1997).
- [13] Н.А. Златин, Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев. *ЖТФ* **57**, **12**, 2346 (1987).
- [14] J. Heijboer. In: *Physics of Non-cryst. Solids. Proc. of Intern. Conf. (Delft. 1964)*. Amsterdam, North-Holland Publ. (1965). P. 231.
- [15] В.В. Шпейзман, Б.И. Смирнов, Н.Н. Песчанская, Л.К. Марков. *ФТТ* **33**, **7**, 2198 (1991).