

Изменения в ступенчатой деформации полимерного композита под влиянием слабых силового и магнитного полей

© Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев, А.Б. Синани

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

(Поступила в Редакцию 23 октября 1997 г.)

Применение прецизионной интерферометрической методики позволяет заметить изменения в характеристиках скачкообразной ползучести стеклообразных полимеров вследствие предварительного влияния слабых внешних полей. На примере полимерного композита показано, что длительное действие малых нагрузок и постоянного магнитного поля заметно снижает неоднородность скорости ползучести при больших напряжениях, т.е. резкость скачков деформации уменьшается. Разделение влияния магнитного и силового полей приводит к выводу, что эффект действия не только силового, но и магнитного поля имеет частично обратимый характер. Данные подтверждают влияние постоянного магнитного поля на локальные потенциальные барьеры процесса деформации немагнитных материалов.

В последние годы возобновился интерес к вопросу о влиянии постоянных магнитных полей (ПМП) на механические свойства таких немагнитных материалов как полимеры [1]. Эффекты объясняются высокой анизотропией диамагнитной восприимчивости полимерных цепей. В [2–4] показано влияние ПМП на характеристики скорости ползучести линейных полимеров при температуре ниже температуры стеклования $T < T_g$. Из [2] следует что при $T = 300$ К, когда релаксационные процессы в полимерах замедляются, значение скорости ползучести $\dot{\epsilon}$ под действием слабого магнитного поля (2 кОе) изменяется лишь при длительных временах действия ПМП на образец. Для некоторых полимеров наиболее чувствительной характеристикой является неоднородность скорости h , т.е. степень ее разброса на малых приращениях деформации. Влияние ПМП на степень разброса скорости для разных полимеров — разное при равных условиях опыта и зависит от магнитной восприимчивости материала [2,4]. Предполагается, что ПМП выравнивает локальные магнитные поля в физических узлах, которые являются причиной скачкообразного движения дефектов, отраженного в ступенчатой деформации, или в разбросе скорости ползучести [3]. Действие ПМП приводит, как правило, к уменьшению степени неоднородности скорости. Подобный эффект наблюдается, особенно на хрупких телах, и в результате предварительного действия малых механических напряжений. Можно предполагать, что уменьшение резкости скачков деформации, вызванное действием на образец полей любой природы, соответствует меньшему разбросу в прочности и долговечности материала.

Ранее влияние магнитного поля на ползучесть изучали для линейных полимеров в стеклообразном состоянии [2–4]. В практике широкое применение находят более сложные системы: композиты на основе отвержденных смол, имеющих сетчатое строение. В подобных системах большую роль играют адгезионные слои между связующим (смолой) и наполнителем, материалы отличаются неоднородным строением как на молекулярном, так и на надмолекулярном уровнях.

Цель работы — оценить степень изменений в скачкообразной ползучести полимерного композита под влиянием слабых силового и магнитного полей.

1. Образцы и методика

При одноосном сжатии исследовали изменения в скорости ползучести композита, состоящего из эпоксидной смолы и диабазовой муки. Размер среднего диаметра зерен диабазы равен 0.315 мм. Образцы имели высоту 6 мм и диаметр 3 мм. Температура 290 К, при которой проводили опыты, относится к релаксационной области, наиболее чувствительной к изменению структуры адгезионных слоев в аналогичных композитах [5]. В схеме регистрации процесса ползучести использовали лазерный интерферометр [2–7]. Синусоидальная форма записи деформации во времени позволяет измерять по частоте биений скорость ползучести и ее изменения с точностью до $\sim 1\%$ на базе деформации $0,3 \mu\text{m}$. До нагружения и начала ползучести образец находился под действием пуансона, что использовали для проверки предварительного влияния на ползучесть слабого силового поля σ_0 наряду с ПМП. Постоянный магнит вводили в установку так, чтобы образец, находящийся под пуансоном, располагался между полюсами магнита. Ось образца была перпендикулярна направлению напряженности \mathbf{H} магнитного поля. Ползучесть наблюдали при нагружении композита большими напряжениями σ на определенное время ($t = 20$ или 10 min), общая деформация не превышала 3.5%. Последние 20 биений на диаграмме использовали для расчета скоростей, затем строили зависимость скорости $\dot{\epsilon}$ от последовательных приращений деформации $\Delta\epsilon$ на $0.3 \mu\text{m}$.

Ранее было установлено, что ползучесть полимеров имеет скачкообразный характер, связанный с неоднородностью надмолекулярной структуры [3–7]. В данной работе по графикам $\dot{\epsilon} - \Delta\epsilon$ рассчитывали одну из характеристик ступенчатой ползучести: $h = \sum_{n=1}^m (\dot{\epsilon}_n^{\max} / \dot{\epsilon}_n^{\min} / m)$,

где $\dot{\epsilon}^{\max}$ и $\dot{\epsilon}^{\min}$ — максимальные и минимальные значения скорости в периодах n ее изменения. Величину h определяли как среднее из 5 периодов на одинаковом участке деформации для разных опытов. Значение h исследовали для ползучести при напряжениях $\sigma = 47$ и 60 МПа после разного времени t_0 предварительного действия ПМП ($H = 2$ кОе) и напряжений ($\sigma_0 = 0.4$ МПа).

2. Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны зависимости скорости ползучести от деформации для исходного образца композита и для образца, бывшего под действием σ_0 и H . Из рис. 1 видно, что средние скорости двух образцов примерно одинаковы, но резкие колебания скорости характерны для исходного образца.

Влияние ПМП и σ_0 проверяли в дальнейшем в более сложных опытах и при большем напряжении σ , иногда на одном образце, чтобы исключить случайные различия в скорости. Ползучесть наблюдали в начальной стадии деформации, где нарушение структуры происходит в локальных объемах и при разгрузках большая часть деформации (с точностью до 0.1%) восстанавливается. На рис. 2 (кривая 1) показано изменение скорости ползучести в зависимости от деформации при нагружении после 17 суток действия ПМП и σ_0 . Видно, что разброс скорости мал. Затем образец разгружали и повторяли процедуру при одном и том же σ через разное время t_0 выдержки образца без магнитного поля ($H = 0$), но под действием σ_0 . На кривой 2 (рис. 2) скорость более неоднородна, чем на кривой 1, что указывает на релаксацию, т.е. частичное восстановление неоднородности скорости после удаления ПМП. Зависимость 3 на рис. 2 соответствует ползучести после релаксации материала в течение суток не только без ПМП, но и без σ_0 : неоднородность скорости становится выраженной даже более ясно, чем у исходного композита (рис. 1). Из

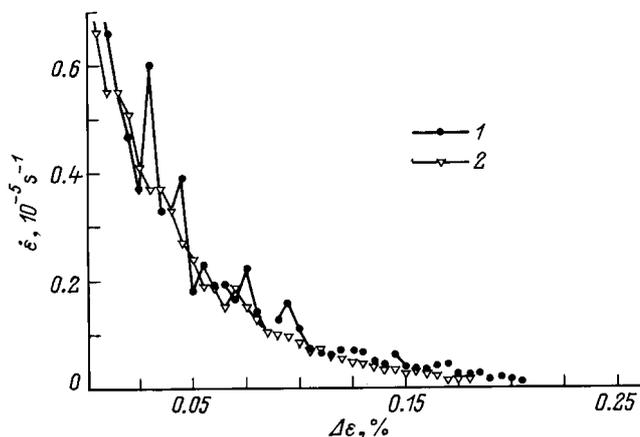


Рис. 1. Зависимость скорости ползучести $\dot{\epsilon}$ от приращения деформации $\Delta\epsilon$ для композита ЭД+диабаз, $\sigma = 47$ МПа, $\epsilon = 3\%$, $t = 20$ min. 1 — $H = 0$, $\sigma_0 = 0$. 2 — $H = 2$ кОе, $\sigma_0 = 0.4$ МПа, $t_0 = 4$ days.

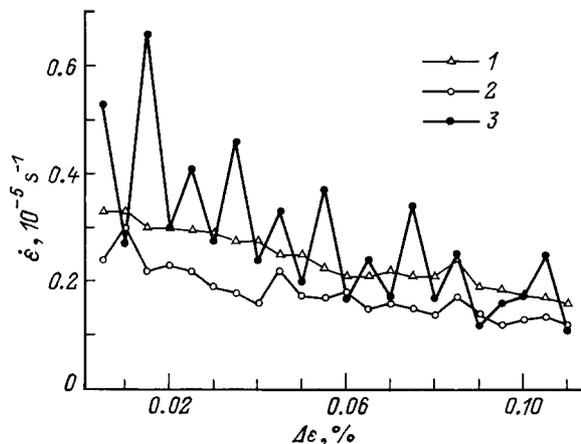


Рис. 2. Зависимость скорости ползучести $\dot{\epsilon}$ от приращения деформации $\Delta\epsilon$ для композита ЭД+диабаз, $\sigma = 60$ МПа, $\epsilon \approx 3.5\%$, $t = 10$ min. 1 — $H = 2$ кОе, $\sigma_0 = 0.4$ МПа, $t_0 = 17$ days, $h \approx 1.15$, 2 — $H = 0$, $\sigma_0 = 0.4$ МПа, $t_0 = 20$ days, $h = 1.35$, 3 — $H = 0$, $\sigma_0 = 0$, $t_0 = 1$ day, $h = 2.2$. 2 — после режима 1, 3 — после 1 и 2.

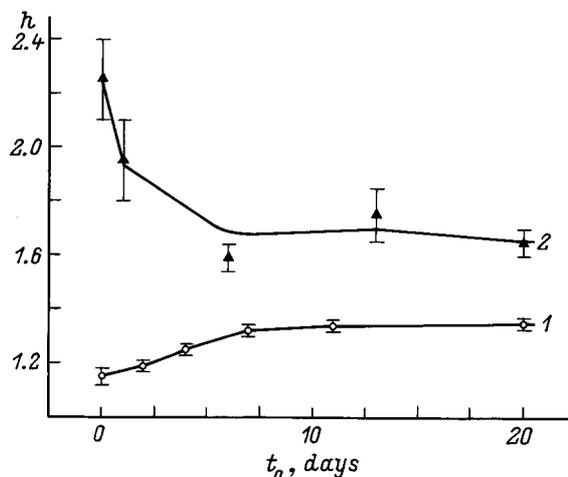


Рис. 3. Зависимость степени неоднородности скорости h для композита от времени t_0 после снятия H , $\sigma_0 = 0.4$ МПа (1) и от времени t_0 действия только σ_0 (2). $\sigma = 60$ МПа, $\epsilon = 3.5\%$, $t = 10$ min. 1 — предварительное действие ПМП (17 дней). Указаны разбросы значений h в пределах пяти измерений.

кривых, подобных показанным на рис. 1,2, полученных за одинаковое время и на одинаковых отрезках деформации, рассчитывали среднее значение h , количественную характеристику степени разброса скорости.

Из рис. 3 (кривая 1) видно, что по мере выдерживания образца, после пребывания в ПМП, при $H = 0$ ($\sigma_0 \neq 0$) значение h подрастает и выходит на насыщение, т.е. магнитное поле уменьшало, хотя и слабо, разброс скорости. Предварительное влияние в течение длительного времени только напряжений σ_0 уменьшает неоднородность скорости h (кривая 2), но не до значения, которое соответствует совместному действию двух полей (рис. 3, $t_0 = 0$).

Таким образом, кривые 1 и 2, рис. 3 дают возможность разделить действие полей и сделать вывод, что и ПМП, и $\sigma_0 \ll \sigma$ уменьшают неоднородность скорости деформации при последующем нагружении ($\sigma \gg \sigma_0$) и что влияние σ_0 , и ПМП имеет релаксационный характер.

Строение композита неоднородно не только на микро-, но и на макроуровне: зернистость, присутствие пор, дефектность границ диабаз–смола. Возможно, что механизм действия полей \mathbf{H} и σ_0 на структуру композита — разный. Например, длительное предварительное действие малых напряжений, не вызывающих роста опасных трещин, может привести к ”залечиванию” микротрещин и пор в результате локальных сдвигов, а влияние магнитного поля — к выравниванию и снижению неоднородности локальных магнитных полей, составляющих часть потенциальных барьеров деформации. В обоих случаях нагружение большими напряжениями сделает движение дефектов по механизму разрыва физических узлов более равномерным, и, следовательно, скачки деформации станут менее резкими [2–4]. Предполагается, что деформационные процессы происходят, в основном, в адгезионных слоях полимера [5].

Обсуждаемые изменения в скорости ползучести могут быть связаны не только с деформацией, но и с трещинообразованием во время ползучести, которое замедляется после предварительного нагружения. Действительно, долговечность композита при 60 МПа без предварительного действия \mathbf{H} и σ_0 была 50 минут, а суммарная долговечность образца после предварительных нагружений малыми напряжениями равна 170 минутам при том же напряжении 60 МПа. Ранее подобные результаты были получены для долговечности полимеров [6,8]. Следовательно, предварительное нагружение напряжением, примерно в 100 раз меньше разрушающего, значительно увеличивает долговечность материала из-за упрочнения его в локальных объемах. Аналогичный эффект можно ожидать и после действия на материал постоянного магнитного поля.

Таким образом, данные подтверждают принципиальную возможность влияния не только малых силовых, но и магнитных полей на формирование кинетических особенностей деформации полимерных, макроскопически немагнитных материалов. Деформация композита в опытах не превышала 3–3.5% и относится к обратной вязко-упругой области. Вязкоупругая деформация связана с локализованными пластическими сдвигами, не взаимодействующими между собой. Поэтому, результаты экспериментально доказывают изменение локальных потенциальных барьеров начальной стадии деформации под влиянием магнитного поля и влияние кинетики локальных сдвигов на механические характеристики макроскопического уровня.

Авторы благодарны Ю. Христовой (АН Болгарии) за предоставление образцов.

Список литературы

- [1] Ю.П. Родин. Механика композит. материалов, 3, 490 (1991).
- [2] Н.Н. Песчанская, В.Ю. Суrowова, П.Н. Якушев. ФТТ 34, 7, 2111 (1992).
- [3] Н.Н. Песчанская, ФТТ 35, 11, 3019 (1993).
- [4] Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев. ФТТ 39, 9, 1690 (1997).
- [5] Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев, Ю. Христова, А. Топлийска. Высокомолекуляр. соединения А35, 9, 1493 (1993).
- [6] В.А. Степанов, Н.Н. Песчанская, В.А. Шпейзман. Прочность и релаксационные явления в твердых телах. Л. (1984). 245 с.
- [7] Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев, Л.П. Мясникова. В.А. Марихин, А.Б. Синани, М. Якобс. ФТТ 38, 8, 2582 (1996).
- [8] В.В. Житков, Н.Н. Песчанская, В.А. Степанов. Механика полимеров, 1, 176 (1972).