

УДК 541.64:539.3

ЖЕСТКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ШЕЙКИ В ВОЛОКНЕ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА

© 2002 г. С. Л. Баженов, А. С. Кечекьян

Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова Российской академии наук
117393 Москва, Профсоюзная ул., 70

Поступила в редакцию 05.04.2001 г.

Принята в печать 06.09.2002 г.

Исследовано распространение шейки в волокне аморфного ПЭТФ диаметром 0.75 мм. Обнаружена новая мода колебаний растягивающей силы при распространении шейки, характеризуемая малой амплитудой и гармоническим характером. Малые колебания наблюдаются при относительно небольшой длине образцов. При некоторой длине образец переходит к высокоамплитудной моде колебаний. Режим возбуждения высокоамплитудной моды является жестким, и она возбуждается тем раньше, чем выше амплитуда отклонения из начального состояния. Осуществлен переход от малых колебаний к высокоамплитудным и обратно. Высокоамплитудные колебания наблюдаются экспериментально при скорости растяжения до 5000 мм/мин в области возрастания напряжения со скоростью растяжения, что не согласуется с существующей теорией данного явления. Существование колебаний в этой области скоростей объясняется жестким характером высокоамплитудных колебаний.

ВВЕДЕНИЕ

Portevin и LeChatelier [1] обнаружили, что при пластическом деформировании металла при температуре ~10 К происходят регулярные колебания растягивающей силы. В полимерах колебания наблюдались при растяжении волокон ПА и ПЭТФ при комнатной температуре [2, 3]. Кечекьян, Андрианова и Каргин показали, что колебания растягивающей силы в пленке ПЭТФ связаны с периодическими скачками фронта шейки вследствие разогрева полимера во фронте шейки на ее границе с неориентированным материалом [4]. Максимальная температура полимера во время скачка шейки T_{\max} достигает 120–140°C. Колебания температуры были установлены путем наложения на поверхность образца легкоплавких порошков, которые периодически плавились в областях максимального разогрева переходной зоны. Сильный разогрев полимера был подтвержден путем измерения интенсивности теплового ИК-излучения. Этим методом была получена более низкая величина $T_{\max} = 95^\circ\text{C}$ [5].

E-mail: bazhenov@ispn.ru (Баженов Сергей Леонидович).

В относительно коротких образцах колебания возникают не сразу после появления шейки, а после достижения образцом некоторой длины [4]. Теория, согласно которой появление колебаний обусловлено переходом от устойчивого к неустойчивому режиму распространения шейки, предложена Баренблаттом [6]. Используя это представление, авторы настоящей работы получили аналитический критерий перехода к неустойчивому (колебательному) режиму распространения шейки [7]. Арнольд рассмотрел устойчивость колебаний в предположении, что возбуждение колебаний является мягким [8].

Режим возбуждения колебаний является мягким, если ниже перехода (в рассматриваемом случае – при малой длине образца) при любой амплитуде первоначального отклонения колебания затухают. Выше критической точки фазовая диаграмма колебаний схематически показана на рис. 1а. Малые отклонения из начального состояния приводят к постепенной раскачке колебаний, и фазовая диаграмма постепенно приближается к так называемому предельному циклу, характеризующему установившиеся колебания. Это же

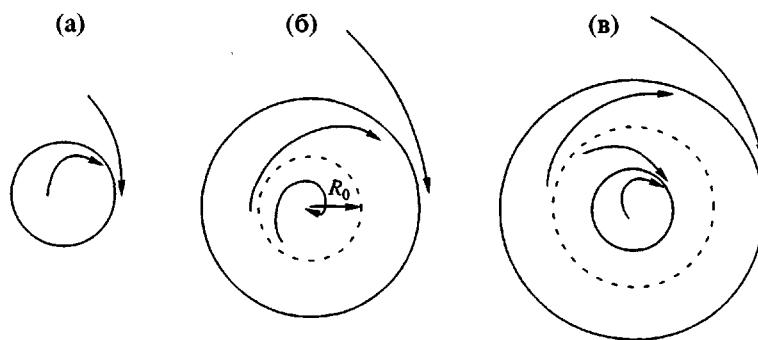


Рис. 1. Фазовые диаграммы колебаний: а – установившиеся колебания, б – жесткий режим колебаний, в – два предельных цикла колебаний.

происходит и в случае, если амплитуда первоначального отклонения настолько велика, что превышает радиус предельного цикла.

При так называемом жестком режиме возбуждения колебаний фазовая диаграмма описывается рис. 1б. В этом случае малые отклонения от начального состояния (амплитудой менее R_0) затухают, однако, если амплитуда первоначального отклонения превышает R_0 , возникают регулярные колебания. Цель настоящей работы – экспериментальная проверка предположения, что режим возбуждения колебаний в волокне ПЭТФ является мягким. Забегая вперед, отметим, что это “очевидное” предположение не подтвердилось, и процесс возбуждения колебаний оказался жестким. Более того, не подтвердилось и предположение, что появление колебаний обусловлено переходом от устойчивого к неустойчивому распространению шейки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали волокна аморфного ПЭТФ диаметром 0.75 мм фирмы “DuPont”. Начальная длина образцов составляла 30–50 мм. Перед растяжением образец перегибали для формирования шейки в рабочей части волокна. Растяжение образцов осуществляли на воздухе при помощи испытательной машины “Autograph” AGS-10 kNG фирмы “Shimadzu”, снабженной компьютером для регистрации результатов. Скорость растяжения изменяли в пределах 0.05–1000 мм/мин. Результаты испытаний усредняли после испытания 10 образцов. Высокоскоростные исследования проводили на специальном оборудовании, позволяющем испытывать образцы со скоростью растяжения 5000 мм/мин. Напряжение вытяжки в этом случае не определяли, а колебания растягивающей силы регистрировали при помощи тензомоста, сигнал с которого подавали на осциллограф.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 2а приведена типичная диаграмма деформирования волокна ПЭТФ, которое периодически обдувалось воздухом, что приводило к всплеску колебаний. При относительно небольших деформациях образца колебания затухали и напряжение возвращалось к исходному значению нижнего предела текучести, что хорошо видно из рис. 2.

Возбуждение колебаний после обдува объясняется охлаждением полимера и возрастанием напряжения вытяжки. После прекращения обдува переходная зона нагревается, напряжение резко снижается и появляются затухающие колебания. В некоторый момент после очередного обдува образца распространение шейки становится колебательным. При обдуве колебания появлялись в среднем при деформации 140%.

На рис. 3а приведен пример самопроизвольного возбуждения колебаний. Если образцы не обдувались, то колебания появлялись самопроизвольно при деформации, равной в среднем 250%, что почти вдвое выше, чем при обдуве. Этот чрезвычайно неожиданный результат свидетельствует о жестком характере возбуждения колебаний.

Всякие сомнения о жестком характере колебаний были сняты экспериментом, в котором удалось не только возбудить, но и погасить колебания. На рис. 4а приведена диаграмма растяжения образца длиной 50 мм, растягиваемого с начальной скоростью 30 мм/мин. При деформации ~70% в точке 1 обдувом возбуждались колебания. В точке 2 скорость растяжения уменьшили вдвое до 15 мм/мин. Колебания остались регулярными, причем их амплитуда несколько возросла. В точке 3 скорость растяжения была уменьшена еще в 4 раза, и колебания исчезли. После этого скорость растяжения была возвращена к 15 мм/мин

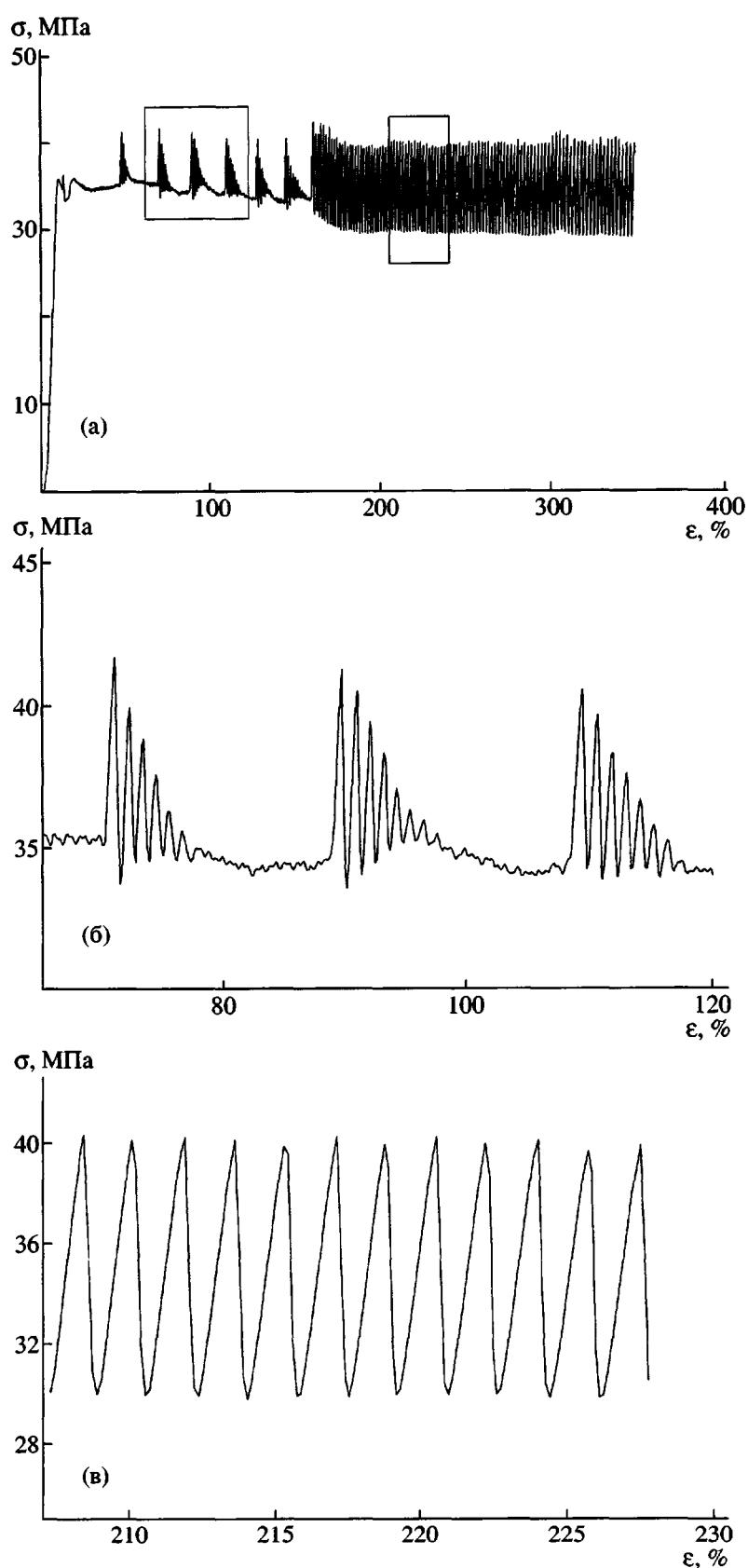


Рис. 2. Характер изменения растягивающего напряжения σ в зависимости от деформации ϵ для волокна ПЭТФ длиной 40 мм (а); б и в – увеличение областей, выделенных прямоугольниками на рис. 2а. Скорость растяжения 20 мм/мин. Образец обдувался в процессе растяжения.

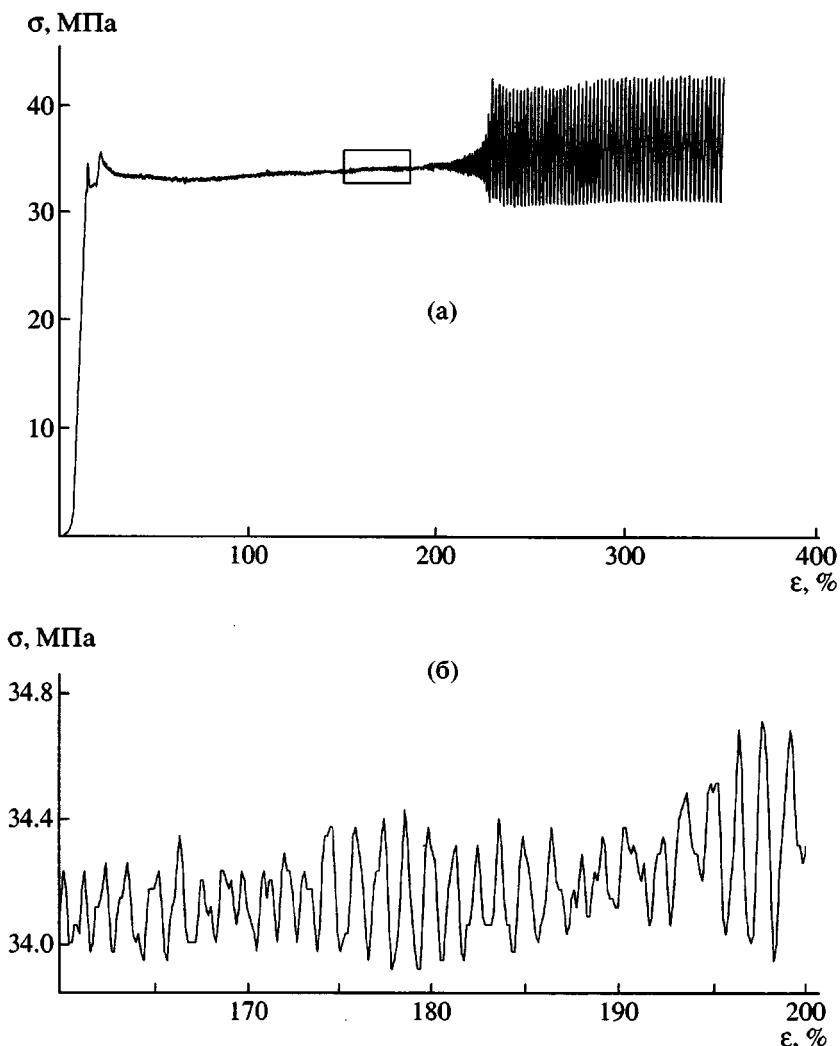


Рис. 3. Растижение образца, идентичного рис. 2 в отсутствие обдува (а); б – увеличение областей, выделенных прямоугольником на рис. За.

(точка 4), и колебания не появлялись вплоть до деформации $\sim 250\%$.

Таким образом, при скорости растяжения 15 мм/мин удалось не только возбудить, но и погасить колебания. Операцию “включения” и “выключения” колебаний при скорости растяжения 15 мм/мин на одном образце можно было повторить до 3–4 раз. Данный эксперимент однозначно доказывает, что возбуждение колебаний является жестким.

Отметим, что при скорости растяжения 15 мм/мин обдувом при деформации 100–150% колебания возбудить не удавалось. Однако при таких же условиях колебания можно было возбудить описанным выше способом растяжения с более высокой скоростью и дальнейшим его снижением. Следовательно амплитуда начального отклонения при обдуве (при скорости растяжения

15 мм/мин) была недостаточной для возбуждения колебаний. Таким образом, эксперименты показали, что колебания возбуждаются тем раньше, чем выше амплитуда начального отклонения. Такое поведение характерно для жесткого возбуждения колебаний.

Малые колебания

Напряжение вытяжки до возбуждения колебаний на рис. За не совсем постоянно. На первый взгляд, кажется, что прибор регистрирует шум. На рис. 3б приведен увеличенный участок диаграммы, отмеченный прямоугольником на рис. За. И при малых удлинениях имеются колебания нагрузки небольшой амплитуды. Эти колебания не очень регулярны, что, возможно, обусловлено случайными ва-

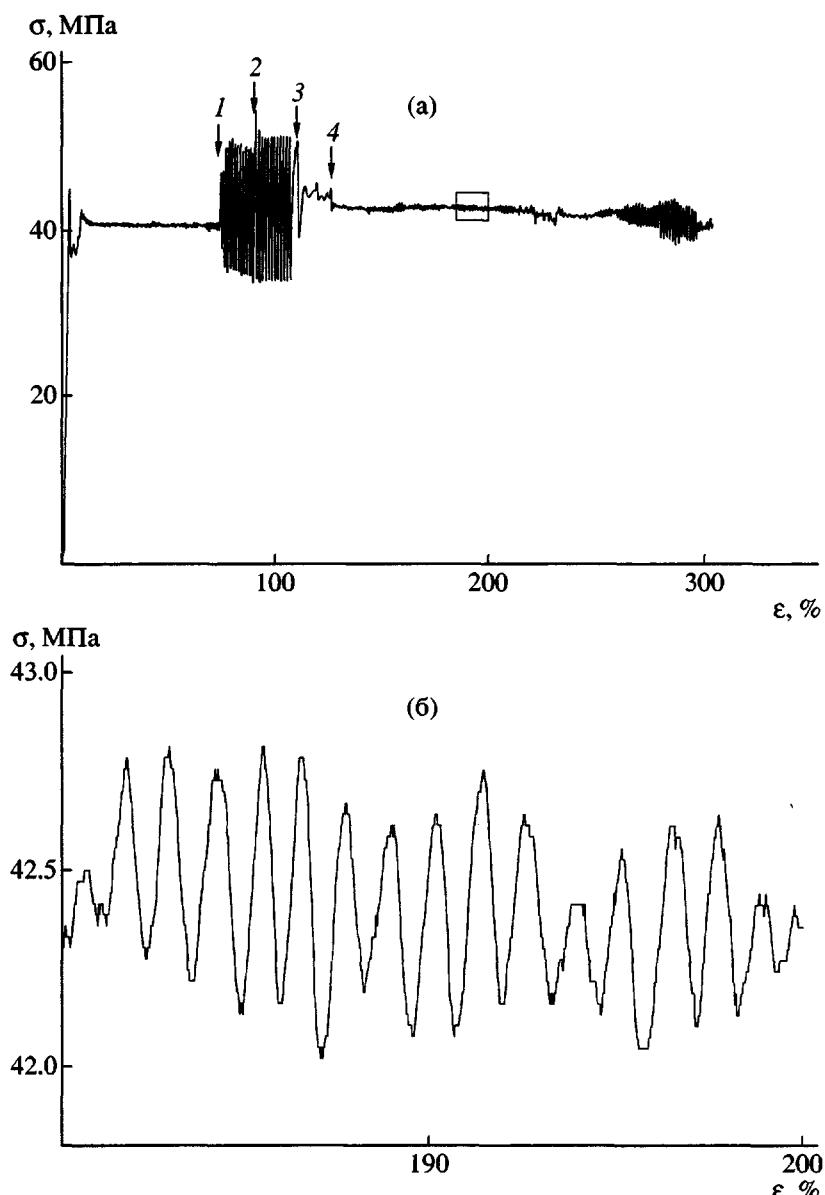


Рис. 4. а – Характер изменения растягивающего напряжения σ в зависимости от деформации ϵ для волокна ПЭТФ длиной 50 мм. Начальная скорость растяжения 30 мм/мин. 1 – возбуждение колебаний обдувом, 2 – уменьшение скорости растяжения до 15 мм/мин, 3 – уменьшение скорости растяжения до 3.75 мм/мин, 4 – увеличение скорости растяжения до 15 мм/мин. б – увеличение области, выделенной прямоугольником на рис. 4а.

риациями среднего напряжения вытяжки вследствие изменения диаметра волокна.

На рис. 4б приведено увеличение области, отмеченной прямоугольником на рис. 4а. Напряжение колеблется и в данном случае, причем колебания несколько более регулярны, чем на рис. 3б. Возможно, это обусловлено тем, что среднее напряжение вытяжки на соответствующем участке волокна более постоянно. Амплитуда колебаний составляет ~ 0.3 МПа, т.е. менее 1% от средней величины напряжения вытяжки. Для проверки, не

обусловлены ли малые колебания испытательной машиной, исследовали пленки ПП, сечение которых подбирали таким образом, чтобы растягивающая сила была близка к растягивающей силе в ПЭТФ. Малые колебания в ПП отсутствовали.

На рис. 4а при деформациях 250–300% появился цуг колебаний, которые затухли и не перешли в высокоамплитудные регулярные колебания. Такие цуги весьма характерны для самопроизвольного возбуждения высокоамплитудных колебаний и указывают на их скорое появление.

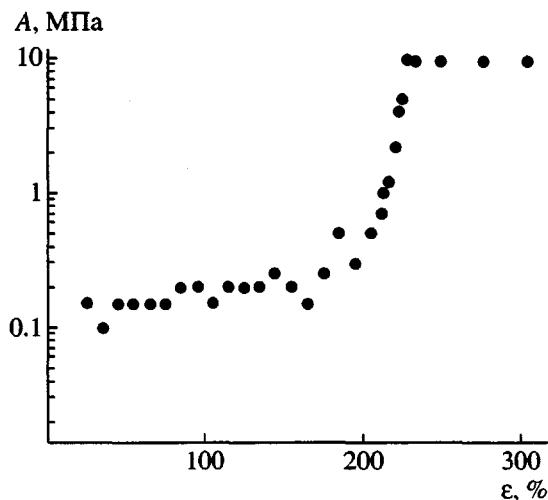


Рис. 5. Зависимость средней амплитуды малых колебаний от деформации образца.

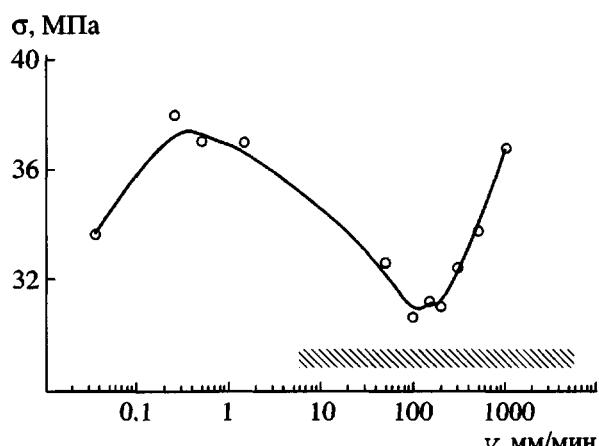


Рис. 6. Зависимость нижнего предела текучести σ от скорости растяжения v . Штриховкой показана область существования высокоамплитудных колебаний.

На рис. 5 представлена типичная зависимость средней амплитуды колебаний в зависимости от деформации. На стадии малых колебаний амплитуда постепенно возрастает с увеличением длины образца, после чего происходит резкий рост амплитуды вследствие изменения моды колебаний.

Ранее, в связи с ограниченными возможностями испытательных машин, малые колебания не замечались, и напряжение на этой стадии вытяжки считалось постоянным. Особенностью данной моды колебаний является их симметричный (гармонический) характер. Напротив, при большой амплитуде колебания являются негармоническими, что выражается в почти треугольной форме пиков на рис. 2в.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно Давиденкову [9], деформирование материала является автоколебательным, если выполняется неравенство

$$d\sigma/dv < 0, \quad (1)$$

где σ – нижний предел текучести, v – скорость растяжения.

Математически критерий неустойчивости (1) был выведен Toda [10, 11]. К неравенству (1) сводится и критерий неустойчивости, полученный в работе [7] в пределе очень большой длины образцов. Поскольку напряжение вытяжки σ связано со скоростью растяжения и величиной разогрева в зоне перехода полимера в шейку, область выполнимости критерия (1) зависит от толщины образца и теплоотдачи на границе с внешней средой (воздухом или жидкостью) [7].

Обычно предел текучести полимеров и металлов линейно увеличивается с ростом логарифма скорости растяжения. Согласно критерию Давиденкова (1) колебания в этом случае наблюдаться не должны. Область колебаний должна совпадать с интервалом скоростей, в котором аномально снижается предел текучести с повышением скорости растяжения. В полимерах такое поведение обусловлено их разогревом во фронте шейки, где происходит переход механической работы в тепло. В металлах имеются не связанные с разогревом причины аномальной скоростной зависимости предела текучести.

На рис. 6 приведена зависимость нижнего предела текучести σ волокна ПЭТФ от скорости растяжения v . Чтобы избежать колебаний нагрузки, нижний предел текучести определяли растяжением коротких образцов. При малых и больших скоростях σ возрастает. Согласно критерию (1), деформирование полимера в данном случае устойчивое. При промежуточных скоростях напряжение снижается, следовательно, распространение шейки неустойчиво.

Как заметил Toda, диапазон скоростей растяжения, в котором наблюдаются колебания, не совпадает с ниспадающей ветвью зависимости $\sigma(v)$ [11]. Для проверки этого наблюдения скорость растяжения в настоящей работе изменяли в широких пределах. Диапазон существования высокоамплитудных колебаний отмечен на рис. 6 штриховкой. Заметим, что верхний предел существования колебаний не установлен в связи с ограниченными возможностями использованной аппаратуры. Вероятно, колебания наблюдаются и при скоростях растяжения выше 5000 мм/мин.

Тем не менее, совершенно очевидно, что этот диапазон критерием Давиденкова (1) не описывается.

Несогласие экспериментальных данных с критерием (1) удивительно лишь если колебания мягкие, поскольку неравенство (1) выводится путем линейного анализа поведения математически малых отклонений напряжения и температуры от стационарных условий. Следовательно, оно описывает устойчивость малых флюктуаций и соответствует мягкому возбуждению колебаний, фазовая диаграмма которых показана на рис. 1а. Жесткие колебания принципиально нелинейны, и область их существования не может быть определена путем линеаризации уравнений, описывающих растягивающее напряжение и температуру. Как следствие, область существования жестких колебаний не обязана описываться неравенством (1), что и объясняет существование колебаний при высоких скоростях (рис. 6). Критерий (1) очевиден, и его несогласие с экспериментальными данными иллюстрирует степень необычности высокоамплитудной моды колебаний.

Таким образом, обнаружен новый тип колебаний при относительно небольшой длине образцов, характеризуемый малой амплитудой, гармоническим характером и невысокой регулярностью колебаний. В коротких образцах низкоамплитудная мода колебания подавляется шумом. В связи с этим минимальная длина, при которой режим распространения шейки можно считать колебательным, зависит от уровня шума и, возможно, от вариации диаметра волокна по его длине. Амплитуда малых колебаний постепенно возрастает по мере увеличения длины образца при вытяжке как показано на рис. 5. Отметим, что результаты использованного в работах [6–8] линейного анализа применимы именно к малоамплитудной моде колебаний.

При растяжении образца в некоторый момент происходит самопроизвольный переход к высокоамплитудной моде колебаний. Это выражается в резком увеличении амплитуды колебаний в относительно небольшом интервале деформаций, причем колебания становятся весьма регулярными и негармоническими. Высокоамплитудные колебания являются жесткими, и попытки их возбудить свидетельствуют о том, что увеличение длины образца приводит к уменьшению амплитуды возмущения (R_0 на рис. 1б), при котором это удается. Возможен и обратный переход к малоамплитудной моде колебаний. Математически такое поведение полимера описывается фазовой диаграммой, показанной на рис. 1в.

Природа высокоамплитудных колебаний не столь ясна, как этоказалось. В частности, появление высокоамплитудных колебаний не связано с переходом от устойчивого к неустойчивому распространению шейки, причем диапазон их существования не описывается критерием (1), что само по себе странно. Авторам не удалось экспериментально установить наличие верхнего предела скоростей растяжений, выше которого колебания не появляются. Все это свидетельствует о том, что характеристики высокоамплитудной моды принципиально отличны от характеристик малых колебаний. Установленным можно считать лишь то, что высокоамплитудная мода обусловлена разогревом полимера в переходной зоне вследствие превращения энергии упругого деформирования образца в тепло. Заметим, что в некоторых работах дискутируется и этот вывод, вполне по нашему мнению обоснованный [12, 13]. Таким образом, информация о причинах высокоамплитудных колебаний недостаточна, и их природа не совсем ясна.

Очевидно, область существования малоамплитудной моды колебаний совпадает с ниспадающей частью зависимости нижнего предела текучести от скорости распространения шейки. Поскольку при высоких скоростях растяжения критерий (1) не выполняется, малые колебания существовать в этой области не могут, следовательно, при скоростях растяжения выше 200 мм/мин диаграмма колебаний должна описываться фазовой кривой, приведенной на рис. 1б, а не на рис. 1в, как при более низких скоростях. Таким образом, фазовая картина колебаний различна при скоростях растяжения выше и ниже 100 мм/мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Portevin A., LeChatelier F. // Trans. Am. Soc. for Steel Treating. 1924. V. 5. P. 457.
2. Hookway D.C. // J. Textile Institute. 1958. V. 49. P. 292.
3. Roth W., Schroth R. // Faserforschung und Textiltechnik. 1960. V. 11. P. 312.
4. Кечекьян А.С., Андрианова Г.П., Каргин В.А. // Высокомолек. соед. А. 1970. Т. 12. № 11. С. 2424.
5. Roseen R. // J. Mater. Sci. 1974. V. 9. P. 929.
6. Баренблатт Г.И. // Механика твердого тела. 1970. № 5. С. 121.
7. Баженов С.Л., Кечекьян А.С. // Высокомолек. соед. А. 2001. Т. 43. N 1. С. 63.
8. Арнольд В.И. Дополнительные главы теории обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1978.

9. Давиденков Н.Н. // Физика твердого тела. 1961. Т. 3. С. 2458.
10. Toda A. // Polymer. 1993. V. 34. P. 2306.
11. Toda A. // Polymer. 1994. V. 35. P. 3638.
12. Pakula T., Fischer E.W. // J. Polym. Sci., Polym. Phys. Ed. 1981. V. 19. P. 1705.
13. Ebener H., Pleuger B., Peterman J. // J. Appl. Polym. Sci. 1999. V. 71. P. 813.

A Rigid Excitation of Mechanical Oscillations Upon Necking in Poly(ethylene terephthalate) Fibers

S. L. Bazhenov and A. S. Kechek'yan

*Enikolopov Institute of Synthetic Polymeric Materials, Russian Academy of Sciences,
ul. Profsoyuznaya 70, Moscow, 117393 Russia*

Abstract—The necking in the fibers of amorphous PET with a diameter of 0.75 mm was studied. A new mode of tensile-force oscillations upon necking was found. This mode is characterized by a low amplitude and harmonic character. Low-amplitude oscillations are observed for the test samples with a relatively low length. At a certain length, the sample passes to a high-amplitude mode of oscillations. The excitation regime of this high-amplitude mode is rigid, and the higher the amplitude of deviation from the initial state, the earlier the excitation of this mode. A forward transition from low- to high-amplitude oscillations and a back transition are described. High-amplitude oscillations are experimentally observed at a strain rate below 5000 mm/min in the region where the tensile stress increases with increasing the strain rate, and this fact disagrees with the existing theory of this phenomenon. The existence of oscillations in this region is explained by the rigid character of high-amplitude oscillations.