

УДК 541.64:539.3

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА КРЕЙЗИНГ ПОЛИЭТИЛТЕРЕФТАЛАТА В РАСТВОРАХ ПОЛИЭТИЛЕНОКСИДА РАЗЛИЧНОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАССЫ¹

© 2010 г. Е. Г. Рухля, Л. М. Ярышева, А. Л. Волынский, Н. Ф. Бакеев

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова.

Химический факультет

119991 Москва, Ленинские горы

Поступила в редакцию 21.09.2009 г.

Принята в печать 30.11.2009 г.

Исследовано влияние скорости деформирования на поведение ПЭТФ при вытяжке в высоковязких средах, таких как жидкий ПЭГ (M 400) и полуразбавленные растворы ПЭО ($M = (4 \times 10^4) - (1 \times 10^6)$). Увеличение скорости растяжения при деформировании ПЭТФ в ПЭГ приводит к изменению механизма вытяжки от крейзинга к сдвиговой деформации, в то время как деформирование ПЭТФ в полуразбавленных растворах ПЭО во всем исследованном интервале скоростей вытяжки происходит по механизму крейзинга. Поведение ПЭТФ при вытяжке в растворах ПЭО практически аналогично механизму растяжения в чистом растворителе. Это свидетельствует об отфильтровывании ПЭО в локальной зоне развивающегося крейза в процессе течения полимерного раствора через образующуюся пористую структуру.

ВВЕДЕНИЕ

Холодная вытяжка аморфных стеклообразных полимеров в ААС происходит по механизму классического крейзинга и сопровождается развитием особого вида пористости [1–9]. В качестве ААС используют жидкости, в которых полимер практически не набухает, но они снижают его поверхностное натяжение. Однако наряду с этим к ААС предъявляется еще одно требование, связанное с кинетикой транспорта жидкости в вершину растущего крейза. Для эффективного развития крейзинга среда должна успевать проникать в вершину растущего крейза. В противном случае деформация полимера осуществляется как на воздухе с развитием шейки. В работах [10–12] были определены условия реализации механизма крейзинга, обусловленные кинетикой развития крейзов и скоростью течения жидкости в пористой структуре. Одним из параметров, определяющим скорость течения жидкости, является ее вязкость, а переход от крейзинга к сдвиговой деформации наиболее заметен при деформировании полимеров в высоковязких средах в области высоких скоростей растяжения.

Большинство работ по исследованию крейзинга аморфных стеклообразных и кристаллических полимеров было выполнено с использованием низкомолекулярных ААС, вязкость которых не превышала 40 сП (олеиновая кислота) [9]. Однако ранее [13, 14] было установлено, что деформирование полимеров по механизму крейзинга может происходить не только в окружении низкомолекулярных жидкостей, но и в среде жидких олигомеров. В частности, жидкие олигомеры, такие как ПЭГ и ППГ, несмотря на их высокую вязкость, по отношению к ПЭТФ и ПЭВП являются эффективными ААС. Деформирование полимеров в них осуществляется по механизму крейзинга и сопровождается возникновением в образце нанопористой структуры. Более того, оказалось, что такой механизм деформации ПЭТФ и ПЭВП удастся реализовать в еще более вязких средах, а именно в полуразбавленных растворах гибкоцепных полимеров с $M > 1 \times 10^6$ [15, 16].

Интерес к этим работам связан прежде всего с тем, что в результате такого деформирования в полимере развивается нанопористая структура, заполненная окружающим раствором. Если деформирование осуществляется в растворе, содержащем различные низкомолекулярные соединения, происходит их проникновение в пористую структуру и образование композита, в котором и полимер, и вводимое вещество диспергированы до наноуровня. Если деформирование осуществляется в присутствии жидких олигомеров или в растворах высокомолекулярных соединений, они

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 09-03-00430-а), грантом государственной поддержки Ведущих научных школ (НШ-2467.2008.3) и Государственным контрактом № П1484.

E-mail: katrin310@yandex.ru (Рухля Екатерина Геннадьевна).

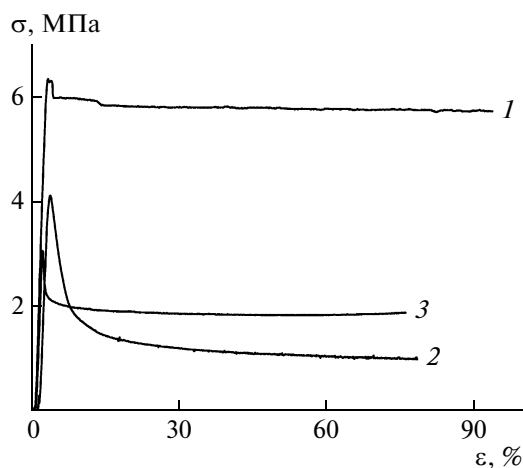


Рис. 1. Динамометрические кривые растяжения ПЭТФ на воздухе (1), в ПЭГ (2) и в изопропаноле (3).

также способны проникать в нанопористую структуру крейзов. В результате этого образуется полимер-олигомерная или полимер-полимерная смесь. Поскольку вязкость растворов значительно превышает вязкость использовавшихся ранее низкомолекулярных ААС, необходимо было определить, насколько эффективны эти жидкости как ААС и как влияет скорость вытяжки полимера на механизм деформации.

Цель настоящей работы — исследование влияния скорости вытяжки на механическое поведение ПЭТФ при его деформировании в таких высоковязких средах, как жидкие олигомеры (ПЭГ) и растворы ПЭО с $M = (4 \times 10^4) - (1 \times 10^6)$.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовали пленки аморфного неориентированного ПЭТФ толщиной 100 мкм. Перед деформированием пленки механически обрабатывали в присутствии изопропанола для создания поверхностных дефектов и создания максимального количества крейзов. Образцы с размером рабочей части 6.15×20 мм деформировали с помощью динамометра "Instron" (модель 4301) при постоянной скорости растяжения 0.2–260 мм/мин в среде ПЭГ с $M = 400$ (ПЭГ 400), а также в 20%-ном водно-этанольном растворе ПЭО с $M > 10 \times 10^5$, 5%-ном водно-этанольном растворе ПЭО с $M = 1 \times 10^6$ ("Aldrich"). Пористость полимера, деформированного в жидких средах, определяли как отношение приращения объема образца в процессе вытяжки ΔV к объему деформированного полимера $V_0 + \Delta V$: $W = \Delta V / (V_0 + \Delta V)$, где V_0 — исходный объем полимера.

Геометрические размеры образца ПЭТФ, деформированного до определенной степени, измеряли с помощью проектора с десятикратным

увеличением и оптиметра ИЗВ-2 с точностью измерений ± 1 мкм. Образцы, деформированные в растворах высокомолекулярных соединений, сушили в вакууме до постоянной массы для удаления растворителя и весовым методом определяли содержание ПЭО в смеси.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При растяжении полимеров в высоковязких жидкостях существуют определенные ограничения в выборе скорости вытяжки, обусловленные транспортными затруднениями при проникновении жидкой среды в места активной деформации полимера (т.е. к вершинам растущих крейзов) [10–12] и изменением механизма деформации. Наиболее заметное изменение механизма деформации наблюдается при исследовании механического отклика полимера на вытяжку в среде. На рис. 1 представлены динамометрические кривые растяжения ПЭТФ со скоростью 0.2 мм/мин на воздухе (кривая 1) и в среде жидкого олигомера ПЭГ 400 (кривая 2). Здесь же приведена и динамометрическая кривая растяжения ПЭТФ в типичной низкомолекулярной ААС, такой как изопропанол (кривая 3). Как видно, деформирование в жидкой среде (как в изопропаноле, так и в жидком олигомере) сопровождается значительным снижением напряжения вытяжки ПЭТФ по сравнению с его растяжением на воздухе, что характерно для полимеров, деформируемых по механизму классического крейзинга [1, 5, 9].

Механическое поведение полимера при деформировании в ААС прямо связано с характером развития крейзов, их зарождением, последующим ростом и уширением. Как было показано в работах [5, 9], анализ динамометрических кривых растяжения позволяет судить об эффективности отдельных стадий развития крейзов. Их зарождение происходит при достижении критического напряжения, которое на динамометрической кривой растяжения отвечает области до предела вынужденной эластичности. Предел вынужденной эластичности соответствует прорастанию наиболее быстро растущих крейзов (или их ансамбля) через поперечное сечение образца, а напряжение стационарного деформирования на динамометрической кривой растяжения — прорастанию всех зародившихся крейзов через поперечное сечение образца, после чего следует стадия их уширения. Таким образом, вид динамометрической кривой растяжения полимера в ААС определяется числом зародившихся крейзов и кинетикой их развития, а скорости роста и уширения крейзов — скоростью проникновения жидкости в пористую структуру и скоростью деформирования полимера. Такая картина развития крейзинга показывает, что механизм деформации, а следовательно, и механический отклик по-

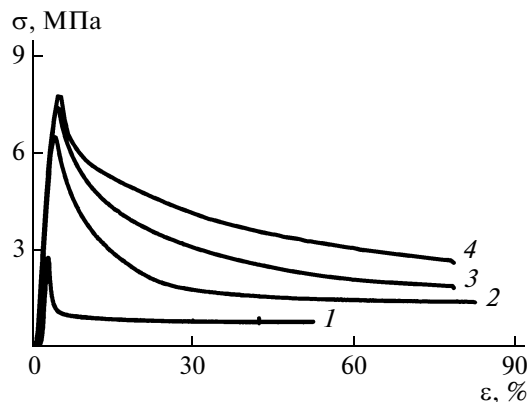


Рис. 2. Динамометрические кривые растяжения ПЭТФ в ПЭГ 400. Скорость вытяжки 0.2 (1), 5.4 (2), 10 (3) и 20 мм/мин (4).

лимера контролируются соотношением скоростей деформации и вязкого течения жидкости в локальной зоне деформации.

Наиболее ярко кинетические затруднения в процессах деформации полимеров в жидких средах, связанные со скоростью транспорта жидкости, проявляются при изучении механических характеристик в широком диапазоне скоростей растяжения. Такие исследования ранее были проведены для ПВХ и ПЭТФ с использованием широко круга низкомолекулярных ААС [12–14]. Было установлено, что для каждой жидкости существует некоторая критическая скорость растяжения, выше которой среда перестанет влиять на предел вынужденной эластичности полимера. Чем выше вязкость среды, тем ниже критическая скорость растяжения, при которой изменяется механизм вытяжки.

Динамометрические кривые растяжения ПЭТФ в среде ПЭГ 400 при деформировании полимера в широком диапазоне скоростей вытяжки представлены на рис. 2. При малых скоростях динамометрические кривые растяжения имеют обычный вид – прямолинейный начальный участок, предел вынужденной эластичности и четко выраженная область плато. С повышением скорости деформации основные изменения наблюдаются в характере выхода динамометрических кривых на плато. При деформировании ПЭТФ с малой скоростью после достижения предела вынужденной эластичности происходит резкое падение напряжения и выход динамометрической кривой на плато. С увеличением скорости растяжения напряжение после предела вынужденной эластичности снижается не так резко и переход к стационарному напряжению деформирования сдвигается в область больших степеней вытяжки.

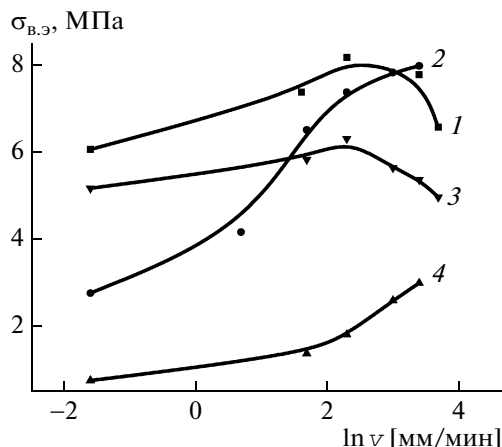


Рис. 3. Зависимость предела вынужденной эластичности (1, 2) и напряжения стационарного деформирования (3, 4) при деформировании ПЭТФ на воздухе (1, 3) и в ПЭГ 400 (2, 4).

Подобное изменение динамометрических кривых характерно для деформирования ПЭТФ в типичных ААС и связано с явлением, получившим название эффекта множественности числа мест локализованной пластической деформации [5, 7, 17]. Повышение скорости деформирования, как показано в работах [18–21], сопровождается увеличением числа зародившихся крейзов и уширением их распределения по скорости роста. В силу этого и выход динамометрической кривой растяжения на плато наблюдается в области больших степеней вытяжки.

Сопоставим скоростные зависимости механических характеристик при вытяжке ПЭТФ в среде ПЭГ 400 и на воздухе (рис. 3).

Предел вынужденной эластичности и напряжение стационарного деформирования при растяжении ПЭТФ на воздухе в области малых скоростей линейно зависят от логарифма скорости растяжения, что согласуется с классическими представлениями о деформации стеклообразных полимеров и соответствующими уравнениями Лазуркина и Эйринга. Вместе с тем для ПЭТФ, деформируемого на воздухе с высокими скоростями, наблюдается падение предела вынужденной эластичности и напряжения стационарного деформирования. Это явление обсуждалось в литературе и было связано с затрудненными условиями теплоотвода от деформируемого образца [22]. При растяжении ПЭТФ в жидкой среде условия теплоотвода улучшаются, что позволяет судить о поведении ПЭТФ в области более высоких скоростей растяжения.

Как видно из данных рис. 3, зависимость напряжения вынужденной эластичности ПЭТФ при вытяжке в среде ПЭГ 400 (кривая 4) в области малых скоростей деформации лежит ниже, чем на воздухе. Однако при повышении скорости растя-

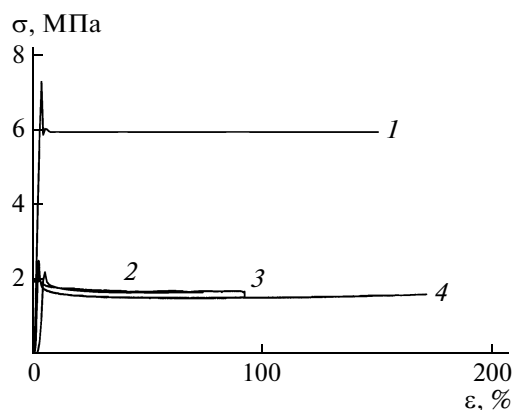


Рис. 4. Динамометрические кривые растяжения ПЭТФ со скоростью 6 мм/мин на воздухе (1), в водно-этанольном растворе (2) и в водно-этанольных растворах ПЭО с $M = 1 \times 10^6$ (3), 4×10^4 (4) и концентрацией 5.5%.

жения до ~ 10 мм/мин предел вынужденной эластичности приближается к значениям, характерным для вытяжки на воздухе.

Напряжение стационарного деформирования ПЭТФ в среде ПЭГ 400 увеличивается с возрастанием скорости вытяжки так же, как и на воздухе. В области скоростей вытяжки более 10 мм/мин увеличение напряжения в среде выражено более резко. Однако во всей области исследованных скоростей вытяжки напряжение стационарного деформирования в среде остается ниже, чем на воздухе.

Наблюдаемые изменения механических характеристик ПЭТФ в зависимости от скорости растяжения свидетельствуют о переходе в области высоких скоростей вытяжки к смешанному механизму деформации полимера, когда наряду с крейзингом в образце начинает развиваться сдвиговая деформация. Подобные примеры деформирования ПЭТФ в ААС по смешанному механизму, когда на начальном участке растяжения в образце образуется шейка, а при падении напряжения после предела вынужденной эластичности развиваются крейзы, описаны в работах [10–12]. Чем выше вязкость среды, тем ниже скорость, при которой происходит переход к смешанному механизму деформации. Очевидно, такой же характер деформации наблюдается и для вытяжки ПЭТФ в ПЭГ 400 в области высоких скоростей растяжения, когда предел вынужденной эластичности в среде практически соответствует вытяжке на воздухе, а напряжение стационарного деформирования еще не достигло значений, характерных для вытяжки на воздухе.

Итак, механическое поведение ПЭТФ в высоковязком ПЭГ описывается теми же закономерностями, что и вытяжка в типичных низкомолекулярных ААС. Иными словами, жидкие олиго-

меры также можно рассматривать как типичные ААС, но их высокая вязкость заметно влияет на скоростные зависимости механических характеристик. Как было показано в работах [13, 14], состав получаемых олигомер-полимерных смесей определяется величиной пористости деформируемого полимера, и содержание олигомера в ПЭТФ может составлять более 45%.

Сохраняются ли описанные выше закономерности крейзинга при вытяжке ПЭТФ в присутствии полимеров более высокой ММ? Для исследования особенностей крейзинга ПЭТФ в присутствии высокомолекулярных соединений были выбраны описанные выше образцы ПЭО с узким ММР, что облегчало анализ особенностей крейзинга в зависимости от ММ вводимого полимера. ПЭО при комнатной температуре являются твердыми веществами, и для выполнения экспериментов использовали их растворы в водно-этанольной смеси. В данном случае воду использовали как растворитель для ПЭО, а этанол — как ААС для ПЭТФ. Концентрация полимера в растворе составляла 5.5–18.6%, т.е. выше кроссовера, что соответствует режиму полуразбавленных растворов.

На рис. 4 представлены динамометрические кривые растяжения ПЭТФ в водно-этанольном растворе ПЭО различной ММ (кривые 1 и 3) с постоянной скоростью деформирования (6 мм/мин). Здесь же для сравнения приведены динамометрические кривые растяжения ПЭТФ на воздухе (кривая 2) и в типичной ААС — в том же водно-этанольном растворе, не содержащем ПЭО (кривая 4).

Динамометрические кривые растяжения ПЭТФ в полимерном растворе, как и динамометрические кривые растяжения на воздухе и в типичной ААС, характеризуются резко выраженным пределом вынужденной эластичности и наличием области стационарного деформирования. По сравнению с растяжением на воздухе растяжение ПЭТФ в растворах ПЭО сопровождается значительным снижением напряжения вытяжки, что является особенностью деформации полимеров по механизму крейзинга [5, 9]. Удивительным фактом явилось то, что напряжение вытяжки в полимерном растворе сопоставимо с напряжением вытяжки в водно-этанольном растворе, не содержащем полимер. Это свидетельствует о высокой эффективности крейзинга в растворах ПЭО, несмотря на их высокую вязкость.

Динамометрические кривые растяжения ПЭТФ с различными скоростями были измерены в водно-этанольных растворах ПЭО с концентрацией 5.5%. Результаты представлены на рис. 5а и 5б; рис. 5в соответствует растяжению ПЭТФ в 20%-ном растворе ПЭО с $M = 4 \times 10^4$; для сравнения на рис. 5г приведены динамометрические

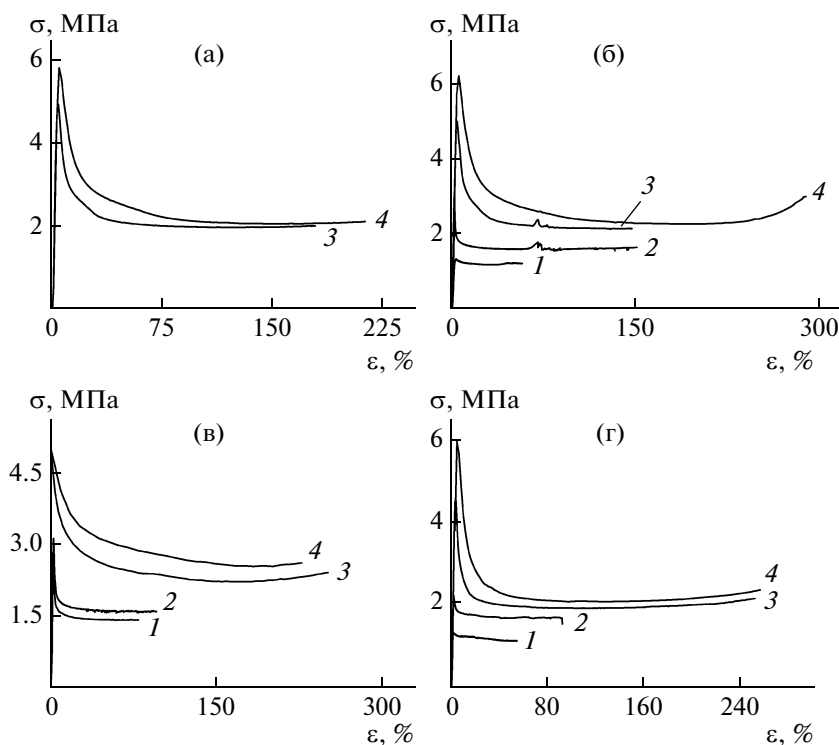


Рис. 5. Динамометрические кривые растяжения ПЭТФ в растворах ПЭО с концентрацией 5.5% (а, б) и 20.0% (в), а также в водно-этанольном растворе (г). Скорость деформирования 0.2 (1), 6 (2), 100 (3) и 265 мм/мин (4). Молекулярная масса ПЭО 4×10^4 (а, в) и 1×10^6 (б).

кривые растяжения ПЭТФ в водно-этанольном растворе, не содержащем ПЭО.

Как видно, несмотря на высокую вязкость используемых растворов, динамометрические кривые растяжения ПЭТФ мало зависят от ММ и концентрации ПЭО и практически не отличаются от динамометрических кривых растяжения ПЭТФ в чистом водно-этанольном растворе. Во всех случаях на динамометрических кривых растяжения присутствуют ярко выраженный предел вынужденной эластичности и область стационарного деформирования. Чем выше скорость деформирования, тем больше величина деформации, при которой динамометрическая кривая растяжения полимера выходит на плато.

На рис. 6 представлены зависимости предела вынужденной эластичности от скорости растяжения ПЭТФ в растворах ПЭО различной ММ (кривые 3–5) и в том же водно-этанольном растворе без полимера (кривая 2). Для сравнения на этом же рисунке показана зависимость предела вынужденной эластичности от скорости деформирования ПЭТФ на воздухе (кривая 1). Из рисунка следует, что во всей области скоростей растяжения предел вынужденной эластичности ПЭТФ в растворе ПЭО ниже предела вынужденной эластичности при вытяжке на воздухе, что характерно для развития деформации в полимере

по механизму крейзинга. Скоростные зависимости предела вынужденной эластичности в полимерном растворе практически совпадают с таковыми для вытяжки в водно-этанольном растворе, не содержащем ПЭО (кривая 2). Это указывает на

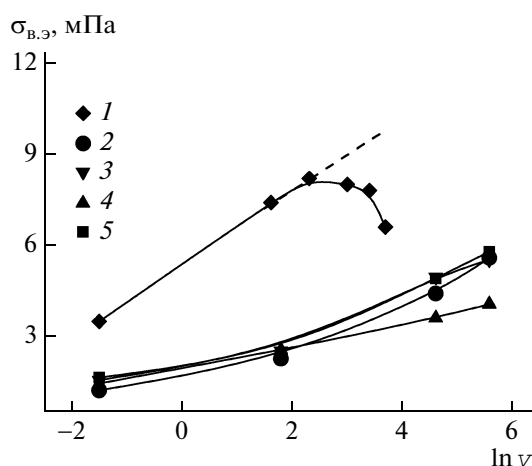


Рис. 6. Зависимость предела вынужденной эластичности от скорости деформирования ПЭТФ на воздухе (1), в водно-этанольном растворе (2) и в растворах ПЭО с $M = 4 \times 10^4$ (3), 4×10^5 (4) и 1×10^6 (5); концентрация растворов 5.5%.

Изменение скорости роста крейзов v_k при деформировании ПЭТФ в водно-этанольных растворах ПЭО различной ММ при разной скорости растяжения

Среда	ММ	с, %	Значения v_k (мм/мин) при скорости растяжения, мм/мин			
			0.2	6	100	265
Водно-этанольный раствор	—	—	0.3	2.3	26.0	60.0
ПЭО	4×10^4	20.0	0.1	1.3	10.0	22.0
	4×10^4	5.5	—	—	18.7	38.5
	1×10^5	5.5	—	2.1	22.7	44.5
	4×10^5	5.5	0.2	1.5	20.0	40.0
	1×10^6	5.5	0.1	2.0	23.0	34.2

то, что присутствие полимера в растворе не снижает эффективность крейзинга во всем исследованном диапазоне скоростей вытяжки.

Подтверждением тому, что деформирование ПЭТФ в растворах ПЭО во всей области исследованных скоростей вытяжки осуществляется по механизму крейзинга, являются данные по пористости. Пористость ПЭТФ, деформированного в растворах ПЭО различной ММ, остается высокой и в выбранном диапазоне скоростей растяжения практически не зависит от скорости вытяжки, как и при вытяжке в водно-этанольном растворе.

Анализ динамометрических кривых растяжения ПЭТФ в растворах ПЭО позволяет оценить скорость роста крейзов, а соответственно и скорость течения полимерного раствора. В работах [15, 16] была определена взаимосвязь механического поведения полимера, деформируемого в ААС по механизму крейзинга, с отдельными стадиями развития крейзов. В частности было показано, что выход динамометрической кривой на плато соответствует прорастанию крейзов через поперечное сечение образца. В связи с этим, определяя время деформации полимера в данной точке и зная геометрические размеры образца, можно определить некоторую эффективную линейную скорость роста крейзов. Как показано в работе [23], вычисленные из динамометрических кривых скорости сопоставимы со скоростями роста крейзов, определенными из прямых наблюдений за скоростью продвижения вершины отдельных крейзов при вытяжке ПЭТФ в ААС. Из анализа динамометрических кривых растяжения ПЭТФ в растворах ПЭО в области перехода к стационарному деформированию определили эффективную скорость роста крейзов в зависимости от скорости деформирования и молекулярной массы ПЭО, присутствующего в растворе. Полученные данные представлены в таблице. Как видно, при деформировании ПЭТФ в полуразбавленных растворах полимеров эффективная линейная скорость роста крейзов сопоставима со скоростью роста крейзов в чистом растворителе,

несмотря на значительные различия вязкости среды. Наблюдается лишь небольшое снижение скорости, которое становится более заметным с увеличением концентрации и ММ полимера.

Таким образом, деформирование ПЭТФ в растворах высокомолекулярного ПЭО осуществляется по механизму крейзинга и сопровождается образованием пористой структуры. Анализ поведения ПЭТФ в растворах высокомолекулярного ПЭО позволяет предположить, что доминирующее влияние на развитие крейзов оказывает растворитель, являющийся ААС. Именно его проникновение в вершину крейза определяет скорость развития крейзов и поведение ПЭТФ при вытяжке в среде. Вместе с тем, как было показано [15, 16], макромолекулы ПЭО из полуразбавленных растворов достаточно высокой ММ также проникают в пористую структуру. Это может происходить вследствие того, что полимерный раствор всасывается в пористую структуру в результате отрицательного гидродинамического давления на границе формирующегося крейза. При этом макромолекулы ПЭО, присутствующие в растворе, заносятся в пористую структуру крейзов текущим растворителем, но не проникают в саму вершину растущего крейза, не влияя на эффективность крейзинга.

Итак, увеличение скорости растяжения при деформировании ПЭТФ в жидком олигомере (ПЭГ 400) приводит к изменению механизма вытяжки от крейзинга к сдвиговой деформации. Деформирование ПЭТФ в растворах высокомолекулярного ПЭО во всем исследованном интервале скоростей вытяжки происходит по механизму крейзинга и осуществляется практически аналогично вытяжке в чистом растворителе, являющемся ААС. Это свидетельствует об отфильтровывании полимера в локальной области развивающегося крейза. Отфильтровывание раствора осуществляется в процессе течения полимерного раствора через пористую структуру крейза, и в вершине его оказывается растворитель с вязкостью, близкой к вязкости чистого растворителя.

Анализ динамометрических кривых растяжения позволил определить эффективную линейную скорость роста крейзов, а соответственно и скорость течения полимерного раствора в локальную зону развивающегося крейза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kambour R.P.* // J. Polymer Sci., Macromol. Rev. 1973. № 7. P. 1.
2. *Kramer E.J.* // Adv. Polym. Sci. 1983. V. 52–53. P. 2.
3. *Kramer E.J., Berger L.L.* // Adv. Polym. Sci. 1990. V. 91–92. P. 1.
4. *Ярышева Л.М., Луковкин Г.М., Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф.* Особенности проявления эффекта Ребиндера в полимерах. М.: Наука, 1992. С. 165.
5. *Volynskii A.L., Bakeev N.F.* Solvent Crazing of Polymers. Amsterdam; New York; Tokyo: Elsevier, 1995.
6. *Волынский А.Л.* // Природа. 2006. № 11. С. 11.
7. *Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф.* Структурная самоорганизация аморфных полимеров. М.: Физматлит, 2005.
8. *Estevez R., Tijssens M.G.A., Van der Giessen E.* // J. Mech. Phys. Solids. 2000. V. 48. № 1. P. 2585.
9. *Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф.* Высокодисперсное ориентированное состояние полимеров. М.: Химия, 1985.
10. *Волынский А.Л., Шитов Н.А., Бакеев Н.Ф.* // Высокомолек. соед. А. 1981. Т. 23. № 4. С. 859.
11. *Волынский А.Л., Шитов Н.А., Бакеев Н.Ф.* // Высокомолек. соед. А. 1981. Т. 23. № 5. С. 978.
12. *Шитов Н.А.* Дис. ... канд. хим. наук. М.: МГУ, 1983.
13. *Рухля Е.Г., Аржакова О.В., Ярышева Л.М., Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф.* // Высокомолек. соед. Б. 2007. Т. 49. № 5. С. 920.
14. *Rukhlya E.G., Arzhakova O.V., Dolgova A.A., Yarysheva L.M., Volynskii A.L., Bakeev N.F.* // Int. J. Polym. Analysis and Characterization. 2007. V. 12. № 1. P. 65.
15. *Рухля Е.Г., Ярышева Л.М., Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф.* // Высокомолек. соед. Б. 2007. Т. 49. № 10. С. 1876.
16. *Волынский А.Л., Рухля Е.Г., Ярышева Л.М., Бакеев Н.Ф.* // Рос. нанотехнологии. 2007. Т. 2. № 5–6. С. 44.
17. *Луковкин Г.М.* Дис. ... д-ра. хим. наук. М.: НИФХИ им. Л.Я. Карпова, 1986.
18. *Волынский А.Л., Ярышева Л.М., Бакеев Н.Ф.* // Высокомолек. соед. С. 2001. Т. 43. № 10. С. 2289.
19. *Ярышева Л.М., Чернов И.В., Кабальнова Л.Ю., Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф., Козлов П.В.* // Высокомолек. соед. А. 1989. Т. 31. № 7. С. 1544.
20. *Ярышева Л.М., Пазухина Л.Ю., Бородулина Т.А., Заварова Т.Б., Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф., Козлов П.В.* // Высокомолек. соед. А. 1984. Т. 26. № 11. С. 2380.
21. *Ярышева Л.М., Пазухина Л.Ю., Кабанов Н.М., Луковкин Г.М., Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф., Козлов П.В.* // Высокомолек. соед. А. 1984. Т. 26. № 2. С. 388.
22. *Кечекьян А.С., Андрианова Г.П., Каргин В.А.* // Высокомолек. соед. А. 1970. Т. 12. № 11. С. 2424.
23. *Ярышева Л.М., Долгова А.А., Аржакова О.В., Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф.* // Высокомолек. соед. А. 2002. Т. 44. № 8. С. 1359.