

Б. Б. БОЙКО, Н. И. ИНСАРОВА, Г. В. ВИНОГРАДОВ

## О КРИТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ ЛИНЕЙНЫХ ПОЛИМЕРОВ

(Представлено академиком А. Ю. Ишлинским 22 VI 1971)

К числу особенностей, отличающих вязкоупругие полимерные материалы, можно отнести существование критических явлений при их деформировании, частным проявлением которых, например, является потеря устойчивости течения таких сред (<sup>1-9</sup>).

В настоящей работе исследовался процесс деформирования типичного линейного полимера — полибутадиена с молекулярным весом  $1,54 \cdot 10^5$  при  $M_w/M_n < 1,1$  в прямоугольных каналах, различающихся величиной поперечного сечения и геометрией входа. Были проведены реологические измерения, визуальные наблюдения поля скоростей и поляризационно-оптические исследования. Для визуализации линий тока применялись жесткие частицы люминофора. Опыты проводились при комнатной температуре.

Деформация материала осуществлялась в контейнере, устройство которого было следующим. В стальной плите (рис. 1) толщиной  $d = 6$  мм (плита I) или 10 мм (плита II) прорезалась щель переменной ширины. К этой плите с обеих сторон при помощи пластин с отверстиями (для просвечивания) и болтов прижимались пластины из оптического стекла. Узкая часть закрытой таким образом с боков щели образовывала рабочий канал. Его ширина  $h = 2$  мм, длина  $l = 13,5$  мм в плите I и  $l = 17,7$  мм в плите II. Отношение ширины входной части щели к ширине канала равнялось 6. В одном из вариантов опыта вход в канал в плите I «сглаживался» по цилиндрической поверхности радиуса 2 мм (плавный вход). Фотографирование интерференционных картин и распределения линий тока осуществлялось фотоаппаратом «Старт» и кинокамерой «Конвас». В остальном методика эксперимента не отличалась от описанной в (<sup>10</sup>).

Сдвигающее напряжение на стенке канала  $\tau$  рассчитывалось обычным образом с учетом поправки, связанной с отклонением процесса течения от плоского (<sup>11</sup>). Кривая течения для полибутадиена, полученная в таких устройствах, приведена на рис. 2. Здесь же даны фотографии вытекающих струй, соответствующих определенным  $\tau$ . До  $\lg \tau \approx 6,44$  (назовем эту точку точкой срыва,  $\tau = \tau_c$ ) поведение материала весьма близко к поведению ньютоновской жидкости. При достижении указанного критического напряжения наблюдается резкое возрастание секундного расхода, от  $\lg \tau \approx 6,65$  намечается тенденция к более пологому ходу кривой. Стрелками указан режим, при котором на гладкой поверхности выходящей струи начинают появляться нерегулярная рябь. Затем форма дефектов становится более правильной: они представляют собой ряд относительно мелких рисок. На-

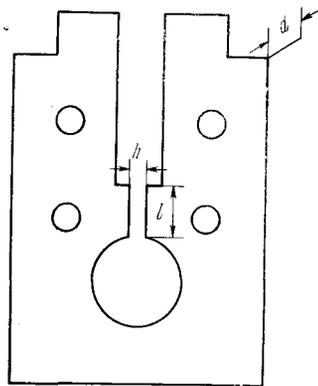


Рис. 1. Схема рабочего узла контейнера

чина с  $\tau_s$ , глубина этих рисок по мере увеличения  $\tau$  уменьшается, а частота растет. Наконец экструдат приобретает форму гладкого прутка, с которого лишь по углам как бы снимается стружка. Однако, например, при  $\lg \tau = 6,75$  вновь получены значительные поверхностные возмущения в выходящем потоке.

Остановимся на особенностях поведения материала, сопоставляя наблюдаемые изменения в картине линий тока и в картинах интерференционных полос для трех характерных областей кривой течения, более или менее

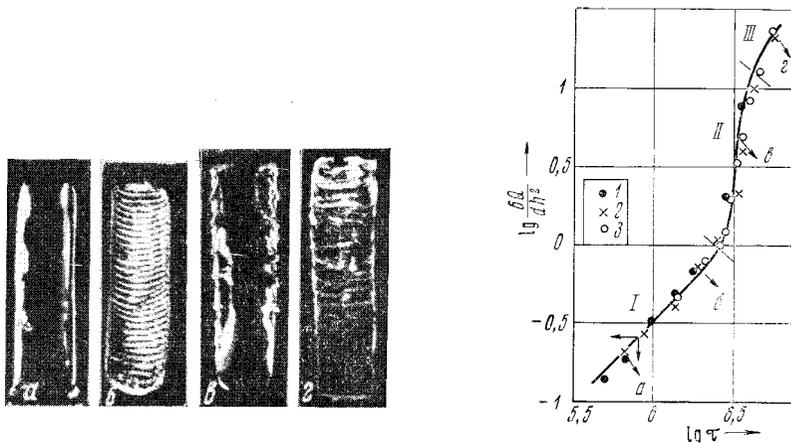


Рис. 2. Кривая течения монодисперсного полибутадиена. 1 —  $d/h = 5$ ; 2 —  $d/h = 3$ ; 3 —  $d/h = 3$ , «плавный» вход;  $Q$  — секундный расход материала. I, II, III — характерные области на кривой течения.  $a - z$  — фотографии струй полимера. Стрелками указаны соответствующие им режимы течения. Ортогонально направленным стрелкам соответствует начало появления возмущения

условно отделенных друг от друга косыми черточками и отмеченных на рис. 2 цифрами. Первой из них свойственна непрерывность линий тока в канале и на входе в него, причем зона входа лишена существующих в некоторых вязкоупругих полидисперсных полимерах циркуляционных зон<sup>(4)</sup>. На рис. 3а, б приведены интерференционные картины, соответствующие режиму течения в этой области. Следует подчеркнуть, что пристенные области вблизи выхода из канала (рис. 3б), так же как и на входе в него, представляют собой места концентрации напряжений. Отметим, что почти до  $\tau_s$  для данного материала во всех использованных вариантах опытов выполняется линейная зависимость между порядком полосы (у стенки), пропорциональным разности главных показателей преломления, и  $\tau$ .

Особенно интересна область II. В этом случае характер течения во входной зоне практически не отличается от наблюдаемого в области I. Лишь у краев прямоугольной щели, ограничивающей вход в канал, возникают зоны неоднородностей в материале, которые распространяются на некоторую часть канала вдоль его стенок. Для того чтобы исключить влияние такого явления на поведение среды в области II, использовался и плавный вход. Именно в данной области близ стенок канала отчетливо наблюдается прерывистое, скачкообразное перемещение введенных частиц, которое является свидетельством существования процесса скольжения — прилипания. Оно начинается в верхней части канала и здесь очень хорошо заметно при плавном входе, затем быстро, при увеличении давления, охватывает весь канал. Оптическая картина в данном случае — чувствительный индикатор происходящего. Она теряет устойчивость, становится несимметричной, порядок полос вдоль стенок канала оказывается разным и периодически меняется со временем (рис. 3в). Такое поведение интерференционных полос свидетельствует о локальной релаксации и накоплении напряжений в материале.

Периодическое проскальзывание, естественно, сопровождается продольными колебаниями оптической картины в зоне входа. В дальнейшем оно приближается к непрерывному скольжению. При скольжении в канале должна наблюдаться постепенная релаксация существующих в полимере на входе напряжений и оптической анизотропии. Это хорошо подтверждается видом

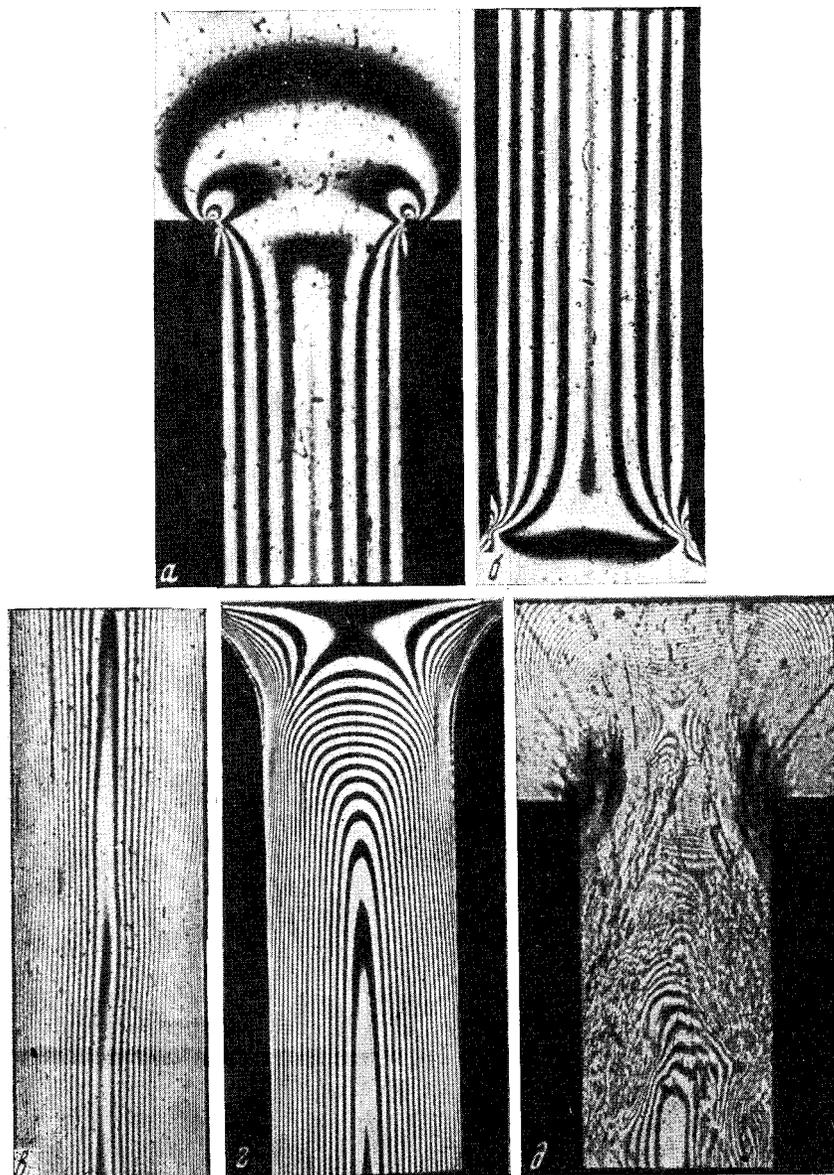


Рис. 3. Картины интерференционных полос, полученные при деформировании полибутадиена в плоском канале; везде  $d/h = 3$ ; а, б —  $\lg \tau = 5,8$ ; в —  $\lg \tau = 6,5$ ; г —  $\lg \tau = 6,6$ ; д —  $\lg \tau = 6,75$ ;  $\tau$ , дин/см<sup>2</sup>

интерференционной картины, приведенной на рис. 3г для  $\lg \tau = 6,6$ : полосы оканчиваются на стенках канала, т. е. порядок полос убывает по его длине.

Согласно (<sup>8</sup>, <sup>9</sup>), развитие процесса скольжения обусловлено переходом полибутадиена в высокоэластическое состояние, где он перестает вести себя как жидкотекучее тело. Это особенно типично для линейных гибко-

цепных полимеров с узким молекулярновесовым распределением. В (<sup>8</sup>, <sup>9</sup>) на это указывает сопоставление результатов визкозиметрических и динамических измерений.

В связи с этим еще раз обратимся к рис. 3б. Концентрация напряжений на стенке канала вблизи выхода может привести к тому, что именно здесь раньше, чем в канале, уже в ньютоновской области кривой течения, произойдет переход полимера в высокоэластическое состояние и разовьется проскальзывание. Следствием этого явится периодическая дефектность выходящей струи. Действительно, характер перестройки интерференционной картины в вытекающем материале при появлении поверхностных искажений полностью подтверждает такое предположение.

Для области III характерно отчетливое проявление неоднородностей в материале, которые появляются на входе в канал, у его краев, причем в области III они свойственны и плавному входу. Эти неоднородности хорошо видны из-за рассеяния на них света (рис. 3д). Создается впечатление, что здесь происходит разрыв сплошности деформируемой среды. В самом канале наступает резкое нарушение режима простого сдвига, линии тока перестают быть параллельными его стенкам и становятся волнистыми, наблюдается своеобразная турбулизация потока. Данной области соответствуют резкие и быстрые, но уже поперечные колебания оптической картины у входа и беспорядочно меняющаяся картина полос в канале (рис. 3д).

Институт физики  
Академии наук БССР  
Минск

Институт нефтехимического синтеза  
им. А. В. Топчиева  
Академии наук СССР  
Москва

Поступило  
17 VI 1971

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> А. Я. Малкин, А. И. Леонов, В сборн. Успехи реологии полимеров, М., 1970. <sup>2</sup> J. P. Tordella, In: Rheology, 5, N. Y.—London, 1969. <sup>3</sup> E. Badley, H. P. Schreiber, In: Rheology, 5, N. Y.—London, 1969. <sup>4</sup> G. A. Bialas, J. L. White, Rubber Chem. and Technology, 42, 675 (1969). <sup>5</sup> G. V. Vinogradov, L. I. Ivanova, Rheol. Acta, 6, 209 (1967). <sup>6</sup> G. V. Vinogradov, L. I. Ivanova, Rheol. Acta, 7, 243 (1968). <sup>7</sup> J. J. Benbow, P. Lamb, SPE Trans., 3, 7 (1963). <sup>8</sup> Г. В. Виноградов, Высокомолек. соед., 13, 294 (1971). <sup>9</sup> Г. В. Виноградов, Ю. Г. Яновский и др., Пластические массы, № 5 (1971). <sup>10</sup> Б. Б. Бойко, Н. И. Инсарова, А. С. Лугина, Мех. полимеров, № 5 (1965). <sup>11</sup> С. И. Губкин, С. И. Добровольский, Б. Б. Бойко, Фотопластичность, Минск, 1957.