

УДК 541.64:536.7:539.2

РАЗОГРЕВ ПОЛИМЕРА В ПОЛОСАХ СДВИГА

© 2022 г. С. Л. Баженов^{a,*}, И. В. Сосновский^b, И. Н. Насруллаев^c

^a Федеральный исследовательский центр химической физики Российской академии наук
119991 Москва, ул. Косыгина, 4, Россия

^b Московский педагогический государственный университет
119991 Москва, ул. Малая Пироговская, 1, Россия

^c Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
105005 Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, Россия

*e-mail: sergey.l.bazhenov@gmail.com

Поступила в редакцию 24.06.2021 г.

После доработки 22.11.2021 г.

Принята к публикации 12.01.2022 г.

При сжатии и растяжении аморфных полимеров пластическое течение часто локализуется в системе полос сдвига. Сдвиговые напряжения совершают работу, которая переходит в теплоту, и полимер разогревается. При прокатке аморфного полиэтилентерефталата наблюдается набор пересекающихся полос сдвига. Полоса, появившаяся позднее, оставалась прямой, а возникшая раньше приобретала вид кинка. Деформация сдвига в полосе постоянна по толщине и равна $78 \pm 14\%$, что соответствует углу излома кинка $38 \pm 5^\circ$. Получено аналитическое решение, описывающее распределение температуры по толщине полосы сдвига. Температура максимальна на ее фронте. Расчеты позволяют сделать вывод, что разогрев в полосах сдвига — специфически полимерное явление, которым в металлах можно пренебречь. После зарождения в тонких полосах температура растет пропорционально корню квадратному из толщины полосы. При увеличении толщины максимальная температура полосы приближается к адиабатическому пределу, при котором потерями теплоты можно пренебречь.

DOI: 10.31857/S2308112022030099

ВВЕДЕНИЕ

Ориентационная вытяжка является эффективным способом повышения прочности и модуля упругости линейных полимеров [1–6]. Например, высокопрочные волокна получают вытяжкой в десятки раз при температуре немного выше температуры стеклования. Однако существует еще одна причина ориентации полимеров. Даже сравнительно небольшая ориентационная вытяжка (в полтора–два раза) выше температуры стеклования приводит к повышению пластичности и значительному снижению температуры хрупкости ряда стеклообразных полимеров. Альтернативный метод ориентации — холодная прокатка полимеров между двумя валками, вращающимися в противоположных направлениях [6–18]. При прокатке полимер оказывается в условиях сжатия, что уменьшает вероятность разрыва и позволяет проводить ориентацию в комнатных условиях. Например, после прокатки пластичным становится даже ПС [12, 13].

Представляется еще более важным то, что прокатка позволяет подавить хрупкое поведение дисперсно-наполненных полимеров [17] и нанокон-

позитов [18–20]. Основной недостаток наполненных полимеров — их хрупкость, связанная с образованием шейки при растяжении. Композиты на основе полимеров, деформирующихся без шейки, остаются пластичными до очень высоких степеней наполнения. Примеры — композиты на основе каучука [21] и сверхвысокомолекулярный ПЭ [18]. Прокатка подавляет образование шейки, и прокатанные полимерные композиты сохраняют пластичность, что вызывает интерес к изучению механизма деформирования в процессе прокатки.

Пластическое течение металлов и аморфных полимеров обычно развивается по двум семействам взаимно-перпендикулярных линий скольжения. Это изучает теория пластичности [22]. В стержнях постоянного сечения они представляют собой два семейства взаимно-перпендикулярных полос сдвига. В стеклообразных полимерах в полосах понижена плотность материала и соответственно повышен свободный объем [23]. После образования полосы сдвига дальнейшее течение облегчено, и напряжение текучести несколько снижается. Это явление называют истинным де-

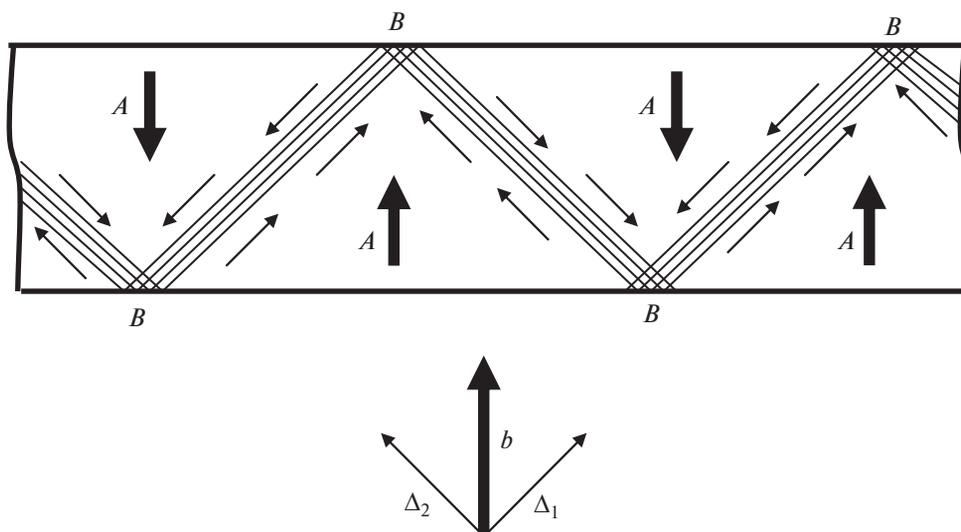


Рис. 1. Схематический рисунок, иллюстрирующий пластическое деформирование пленки аморфного ПЭТФ при прокатке. Нижняя часть рисунка показывает движение недеформированной области *A* в результате двух сдвигов.

формационным размягчением материала. После прекращения деформирования плотность материала в полосах сдвига постепенно возрастает, и предел текучести возвращается к начальному значению. Сдвиг происходит в плоскостях максимального сдвигового напряжения, ориентированных под углом примерно 45° к оси сжатия или растяжения. В аморфно-кристаллических ПЭ и ПП образование микрополос сдвига при комнатной температуре не наблюдается.

При высокоскоростной прокатке пленки полиэтилентерефталата было обнаружено, что два семейства полос сдвига сводятся к единой зоне текучести, напоминающей зубья пилы [24, 25]. Полосы сдвига в данном случае оказываются необычно толстыми, и их толщина достигает десятков микрон. Похожие “толстые” полосы сдвига наблюдали в прокатанных пленках ПА 6. С помощью легкоплавких порошков термоиндикатора было обнаружено, что в полосе сдвига ПЭТФ разогревается, и его температура может достигать 95°C , что выше температуры стеклования полимера $70\text{--}75^\circ\text{C}$ [26]. Разогрев полосы объясняется тем, что сдвиговые напряжения совершают механическую работу, которая почти целиком переходит в теплоту. Доля механической работы β , переходящей в тепло, зависит от полимера [27]. Для полимеров типичное значение β составляет примерно 0.8, а для металлов 0.95. Это означает, что в тепло переходит почти вся совершенная механическая работа. В случае аморфного ПЭТФ коэффициент β зависит от скорости деформирования и при высоких скоростях достигает значения 1.35 вследствие кристаллизации и выделения теплоты кристаллизации [27].

Цель настоящей работы – теоретический анализ разогрева полимера в полосах сдвига.

МОДЕЛЬ

Механизм деформирования пленки ПЭТФ при прокатке с высокой скоростью схематически иллюстрирует рис. 1 [24, 25]. На рисунке представлена боковая поверхность пленки после прокатки. Пластическое деформирование локализовано в толстых полосах сдвига, образующих единую пилообразную зону пластической деформации. Стрелки указывают направление сдвига. Полимер в треугольных областях *A* между полосами сдвига не деформирован. Полуужирные стрелки показывают движение треугольных областей при прокатке. Области пересечения полос *B* принадлежат двум полосам.

Оптическая фотография бокового среза пленки ПЭТФ толщиной 910 мкм, прокатанной со скоростью 4 мм/с, приведена на рис. 2. Степень прокатки, определяемая как отношение начальной H_0 к конечной толщине пленки H , равнялась 1.06. Скорость прокатки была относительно невысокой, и образовалась не одна, как на рис. 1 [24, 25], а несколько полос сдвига. Угол между полосами сдвига составляет $80 \pm 2^\circ$, и полосы располагались почти перпендикулярно. Толщина полос различна и варьируется от 8 до 18 мкм. Материал параллелограммов между полосами пластически не деформирован. Темные полосы сдвига отмечены стрелкой, имеют вид ломаных прямых (кинков). Светлые полосы образовались раньше темных, и светлые полосы превратились в кинки. Заметим, что направление полосы сдвига

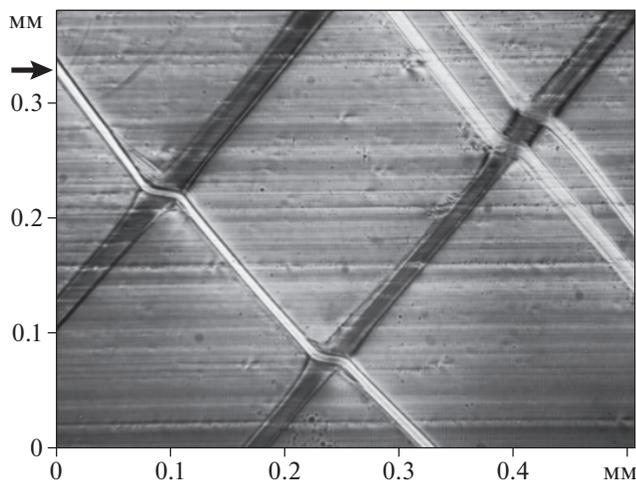


Рис. 2. Фотография бокового среза прокатанной пленки ПЭТФ в поляризованном свете оптического микроскопа. Стрелкой отмечена полоса сдвига с образовавшимся изломом.

после пересечения с другой полосой немного изменяется, что свидетельствует о повороте недеформированных областей, как и при прокатке металлов [28].

Рисунок 3 схематически иллюстрирует пересечение двух полос сдвига. Первой появилась полоса 1, и ее рост в некоторый момент прекратился. После этого ее пересекла перпендикулярная полоса 2. Полоса зародилась в плоскости BF . В результате сдвига прямая AE превратилась в ломаную $ABCD$. Стрелки в треугольнике BCE показывают сдвиговое смещение материала в полосе 2. Сдвиговая деформация записывается как

$$\varepsilon = \Delta/h$$

Сдвиговая деформация $\varepsilon = 0.78 \pm 0.14$, что соответствует углу изгиба кинка $\theta = 38 \pm 5^\circ$.

Линии излома на рис. 2, соответствующие линии BC на рис. 3, близки к отрезку прямой. Это свидетельствует о том, что деформация сдвига по толщине полосы 2 постоянна. При непостоянстве сдвиговой деформации линия BC была бы искривленной. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод, что увеличение толщины полосы сдвига происходит путем фронтального перехода неориентированного материала в полосу, а деформацией в самой полосе можно пренебречь. Очевидно, сдвиговая деформация ограничена упрочнением полимера в результате сдвига, в результате чего дальнейший сдвиг прекращается и в процессе течения вовлекается новый недеформированный материал. В растущей полосе сдвига течение локализовано в плоскости EC .

Рассмотрим одиночную полосу сдвига и предположим, что ее толщина растет с постоянной скоростью v , как показано на рис. 4а. На рис. 3

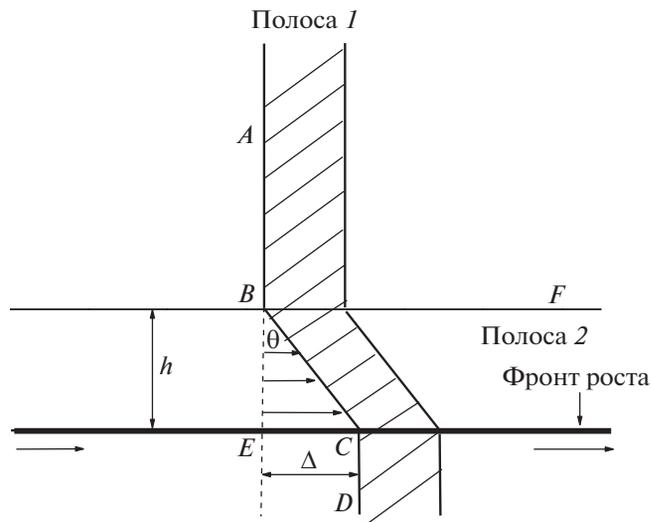


Рис. 3. Схематический рисунок, иллюстрирующий пересечение полосы сдвига 1 перпендикулярной полосой 2. В результате, прямая AA_1 превращается в ломаную $ABCD$.

это соответствует полосе 2, повернутой на 90° . Будем считать, что сдвиговое пластическое течение локализовано во фронте полосы, выделенном черным цветом, а в полосе течения нет. Соответственно тепло выделяется только на фронте полосы сдвига. Направим ось X перпендикулярно плоскости полосы. Фронт полосы и плоскость тепловыделения движется со скоростью v . Решение задачи удобнее описывать в движущейся системе координат, в которой фронт полосы неподвижен, а материал движется со скоростью v , как показано на рис. 4б. Поместим начало координат во фронт утолщающейся полосы сдвига. Тогда плоскость рождения полосы будет удаляться от начала координат со скоростью v , и в момент t_0 ее координата будет $h = vt_0$.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Если толщина полосы сдвига намного меньше толщины пленки, теплоотдачей во внешнюю среду можно пренебречь, и поток тепла направлен по оси X , перпендикулярной плоскости сдвига. Распространение тепла по этой оси описывается уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где T – температура, $a^2 = \frac{k}{\rho c}$ – коэффициент температуропроводности, k – коэффициент теплопроводности, ρ – плотность, c – удельная теплоемкость материала. При расчетах все коэффициенты будут считаться постоянными.

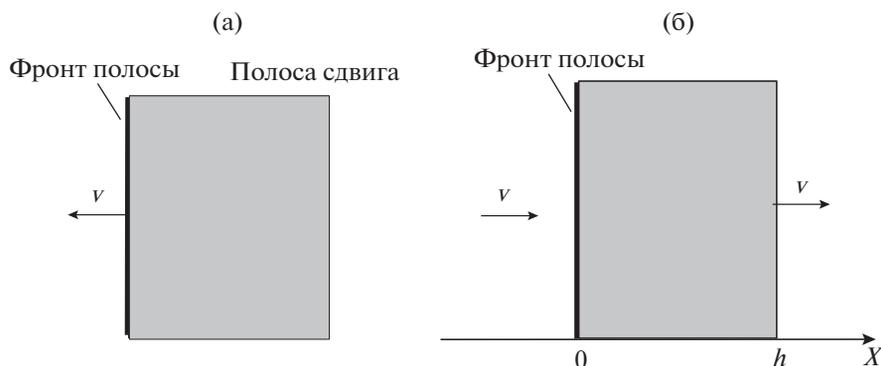


Рис. 4. Схематический рисунок полосы сдвига, растущей со скоростью v (а). В движущейся системе координат (б) фронт полосы неподвижен и находится в плоскости $X=0$, а материал движется со скоростью v . Ось распространения тепла X перпендикулярна плоскости полосы. $h = vt$ – толщина полосы.

Пусть в некоторой точке ξ в начальный момент времени выделилась единица теплоты, тогда в точку x в момент t придет количество теплоты, описываемое функцией Грина

$$G(x, \xi, t) = \frac{1}{2a\sqrt{\pi t}} \exp\left[-\frac{(x - \xi)^2}{4a^2 t}\right] \quad (2)$$

Сдвиговые напряжения τ совершают работу $dA = \tau dy$, где, dy – сдвиговое смещение в полосе, равное ϵdx , $\epsilon = \Delta/h$ – сдвиговая деформация материала полосы. Пусть $dx = v dt$ – дифференциал увеличения толщины полосы, где v – скорость роста толщины полосы. Если в тепло переходит доля β работы, то выделяемая теплота βdA равна $\rho c dT$, где dT – приращение температуры. Источник тепла в интервале времени $[0, t_0]$ двигался с постоянной скоростью из точки h в точку 0 , и температура в произвольной точке x опишется интегралом

$$T = \frac{\beta \epsilon \tau v}{2 \rho c a \sqrt{\pi}} \int_0^{t_0} \exp\left[-\frac{(x - vt)^2}{4a^2 t}\right] \frac{dt}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

Переходом к безразмерной переменной $z = \frac{v\sqrt{t}}{2a}$ получаем

$$T = \frac{2\beta \epsilon \tau}{\rho c \sqrt{\pi}} \int_0^{z_0} \exp\left[-\left(\frac{vx}{4a^2 z} - z\right)^2\right] dz, \quad (4)$$

где

$$z_0 = \frac{v}{2a} \sqrt{t_0} = \frac{\sqrt{vh}}{2a}, \quad (5)$$

(h – толщина полосы). При интегрировании возникает табличный интеграл вида $\int_0^z \exp\left(-y^2 - \frac{b^2}{y^2}\right) dy = \frac{\sqrt{\pi}}{4} \left[\exp(2b) \operatorname{erf}\left(z + \frac{b}{z}\right) + \exp(-2b) \times \operatorname{erf}\left(z - \frac{b}{z}\right) - \exp(2b) + \exp(-2b) \right]$ [28].

Здесь $\operatorname{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-t^2) dt$ – специальная функция, называемая интегралом вероятности. При $x > 0$, что соответствует полосе сдвига и области сзади нее, решение имеет вид

$$T = \frac{\beta \epsilon \tau}{2 \rho c} \left\{ \operatorname{erf}\left(z_0 - \frac{vx}{4a^2 z_0}\right) + 1 + \exp\left(\frac{vx}{a^2}\right) \left[\operatorname{erf}\left(z_0 + \frac{vx}{4a^2 z_0}\right) - 1 \right] \right\}. \quad (6)$$

При $x < 0$, что соответствует области перед фронтом растущей полосы сдвига, имеем

$$T = \frac{\beta \epsilon \tau}{2 \rho c} \left\{ \operatorname{erf}\left(z_0 - \frac{vx}{4a^2 z_0}\right) - 1 + \exp\left(\frac{vx}{a^2}\right) \left[\operatorname{erf}\left(z_0 + \frac{vx}{4a^2 z_0}\right) + 1 \right] \right\} \quad (7)$$

Перейдем к анализу полученного решения. Размер R области разогрева, ограниченный теплопроводностью, оцениваем, приравняв показатель экспоненты в функции источника (2) к единице:

$$\frac{R^2}{4a^2 t_0} = 1 \text{ и } R = \sqrt{4a^2 t_0}. \text{ Толщина полосы сдвига } h$$

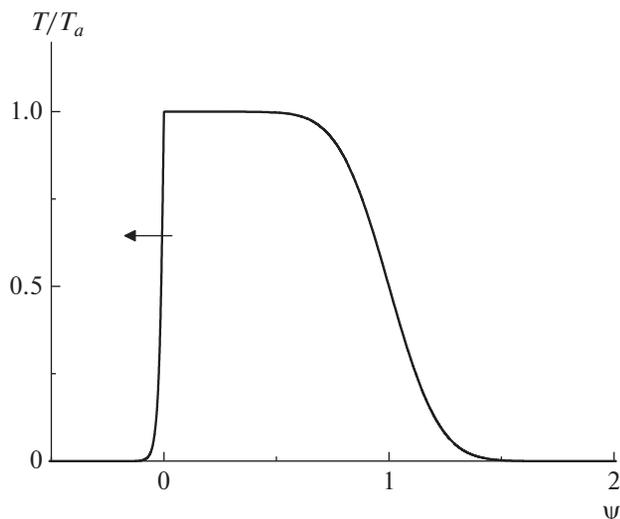


Рис. 5. Распределение относительной температуры разогрева T/T_a по толщине в “толстой полосе” сдвига при $z_0 = 4$; $\psi = vx/(4a^2z_0)$. Фронт полосы – плоскость $x = 0$, а плоскость зарождения имеет координату $\psi = 1$. Полоса находится в отрезке $[0, 1]$.

равна vt_0 , и отношение толщины полосы к размеру области прогрева R равно

$$\frac{h}{R} = \frac{v\sqrt{t_0}}{2a} \quad (8)$$

Таким образом, физический смысл параметра z_0 в решении (6) и (7) – отношение толщины полосы к размеру области прогрева h/R . Полученное решение имеет две асимптотики, соответствующие $z_0 \ll 1$ и $z_0 \gg 1$.

Большая толщина полос. Адиабатический разогрев

При $z_0 \gg 1$ в центре полосы $x = h/2$ первое слагаемое в фигурных скобках выражения (6) равно единице, а третьим слагаемым можно пренебречь. Температура описывается формулой

$$T_a = \frac{\tau\beta\varepsilon}{\rho c}, \quad (9)$$

которая легко выводится из закона сохранения энергии, приравняв производимую механическую работу к величине разогрева полосы $T_a\rho c$. Таким образом, температура T_a описывает адиабатический разогрев полосы сдвига, когда теплопотери можно пренебречь.

Распределение температуры по толщине полосы сдвига при $z_0 = 4$ демонстрирует рис. 5. В этом случае толщина полосы сдвига в четыре раза

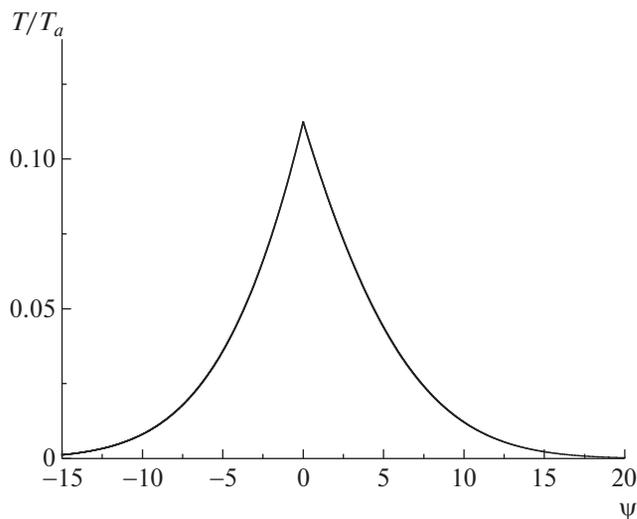


Рис. 6. Распределение относительной температуры разогрева T/T_a в “тонкой полосе” сдвига при $z_0 = 0.1$.

больше длины зоны теплоотдачи R . По абсциссе отложен безразмерный параметр $\psi = \frac{vx}{4a^2z_0}$, а по

ординате – относительная температура T/T_a , где T_a – величина адиабатического разогрева (9). Фронт полосы соответствует точке $\psi = 0$, а координата $\psi = 1$ – точке зарождения полосы. Направление распространения полосы показано стрелкой. Температура полосы везде, за исключением двух краев, соответствует адиабатическому пределу (9). Почти все выделенное тепло остается в полосе сдвига.

Малая толщина полос

При $z_0 \ll 1$ толщина полосы h мала по сравнению с длиной теплопередачи R . Это соответствует начальным стадиям развития полосы сдвига. На рис. 6 приведено распределение температуры по толщине полосы при $z_0 = 0.1$. Как и на рис. 4б, фронт полосы соответствует $\psi = 0$, а $\psi = 1$ отвечает точке ее зарождения. Относительная температура $T/T_a \ll 1$, т.е. температура намного ниже адиабатического предела и максимальна во фронте полосы, где происходит выделение тепла. Распределение температуры почти симметрично и при $\psi < 10$ близко к затухающей экспоненте. Однако при $\psi > 10$ сказывается гауссовский характер функции источника (1), и температура убывает $\sim \exp(-\psi^2)$. В данном случае тепло уходит из полосы сдвига за счет теплопроводности. При

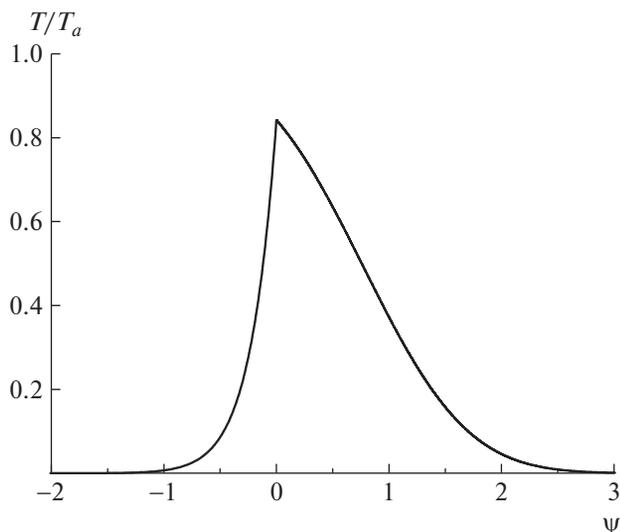


Рис. 7. Распределение относительной температуры разогрева T/T_a при $z_0 = 1$.

$z \ll 1$ функция $\operatorname{erf} z \approx \frac{2z}{\sqrt{\pi}}$, и максимальная температура во фронте полосы описывается формулой

$$T = \frac{2\sqrt{vh}}{\sqrt{\pi a}} T_a \quad (10)$$

Таким образом, температура повышается пропорционально корню квадратному толщины полосы и соответственно корню времени. Растет она и с увеличением скорости деформации v .

Распределение температуры по толщине полосы для $z_0 = 1$, т.е. для перехода между двумя асимптотиками, представлено на рис. 7. Температура близка к адиабатическому пределу T_a , и распределение становится заметно несимметричным. Перед фронтом полосы температура убывает экспоненциально и показатель экспоненты равен v/a^2 .

На рис. 8 приведена зависимость толщины полосы h при переходе к адиабатическому разогреву от скорости сдвига v , определенной из условия $z_0 = \sqrt{vh}/(2a) = 1$ (формула (5)):

$$h = \frac{4k}{\rho c v} \quad (11)$$

Расчет проводили для ПЭТФ при следующих значениях параметров $\rho = 1332 \text{ кг/м}^3$, $c = 1.13 \text{ кДж/(кг К)}$, $k = 0.14 \text{ Вт/(м К)}$ [30]. На рис. 9 показана зависимость относительной величины разогрева T/T_a от толщины полосы h при скорости сдвига $v = 1 \text{ м/мин}$. Разогрев значителен только при толщине более микрона. При толщине более 0.5 мм температура приближается к адиабатическому пределу.

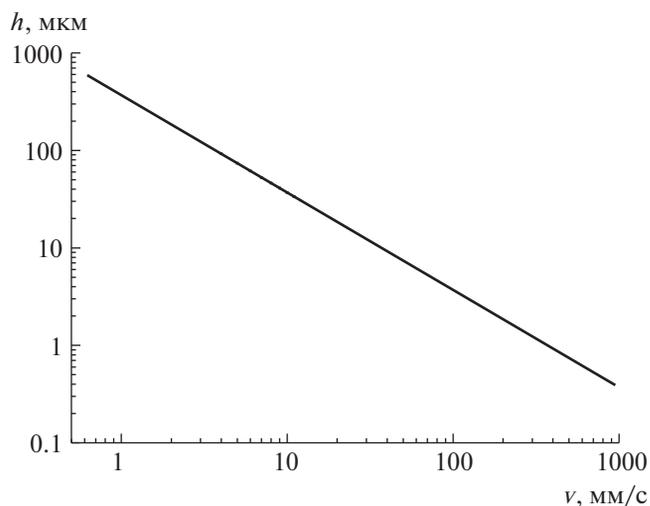


Рис. 8. Зависимость толщины полосы h при переходе к адиабатическому разогреву от скорости сдвига v .

скому пределу. Образование полосы – это неоднородность пластического деформирования, обусловленная микронеустойчивостью процесса течения. Данные рисунка свидетельствуют о том, что при зарождении полосы разогрев невелик и на начальных стадиях деформирования несущественен.

На основании выражения (6) температура во фронте растущей полосы сдвига (при $x = 0$) описывается формулой

$$T = \frac{\beta \gamma \tau}{\rho c} \operatorname{erf} z_0 \quad (12)$$

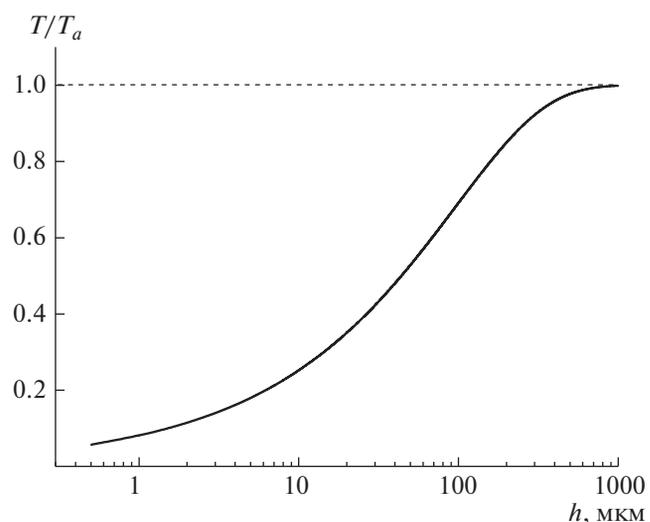


Рис. 9. Зависимость относительной величины разогрева T/T_0 от толщины полосы сдвига h .

Свяжем скорость утолщения полосы v со скоростью прокатки u . Будем считать, что полосы сдвига перпендикулярны. Движение недеформированных треугольных областей на рис. 1 является суммой двух сдвигов, как показано в нижней части рис. 1. Сумма сдвигов описывается суммой двух перпендикулярных векторов Δ_1 и Δ_2 . Его длина равна $b = \sqrt{2}\Delta$. За время прохождения вала между двумя точками В на рис. 1 треугольная область А смещается на расстояние, равное изменению толщины пленки при прокатке:

$$b = H(\Lambda - 1), \quad (13)$$

где $\Lambda = H_o/H$ – степень прокатки, H_o – начальная толщина пленки, H – ее толщина после прокатки. Валок при этом проходит расстояние $2H$. Отношение сдвигового смещения s к расстоянию, пройденному валком, равно отношению скорости сдвиговой деформации w к скорости вала u :

$$\frac{w}{u} = \frac{\Delta}{2H} = \frac{\Lambda - 1}{2\sqrt{2}} \quad (14)$$

Переходя от скорости сдвига к скорости увеличения толщины полосы v и используя соотношение (1), скорость роста толщины полосы опишется формулой

$$v = \frac{\Lambda - 1}{2\sqrt{2}\varepsilon} u \quad (15)$$

Здесь u – скорость прокатки (скорость вала), ε – сдвиговая деформация в полосе. Если в образце сформировалась не одна, а N пилообразных зон, то скорость роста полосы в N раз меньше:

$$v = \frac{\Lambda - 1}{2\sqrt{2}N\varepsilon} u \quad (16)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе рассматривалась теоретическая модель, описывающая разогрев полимера в полосах сдвига. Ранее экспериментально было обнаружено, что температура разогрева в полосах ПЭТФ при высоких скоростях прокатки может достигать 95°C [25], что выше температуры стеклования полимера $\sim 75^\circ\text{C}$. Предполагая, что предел текучести при сдвиге τ равен половине предела текучести при сжатии σ [22], при $\varepsilon = 0.78$, $\beta = 1$ и типичных для ПЭТФ значениях $\sigma = 55$ МПа, $\rho = 1332$ кг/м³, $c = 1.13$ кДж/(кг К) на основании формулы (9) оцениваем адиабатический разогрев как $T = 16^\circ\text{C}$, что значительно меньше наблюдаемого экспериментально разогрева $95^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C} = 72^\circ\text{C}$. Это объясняется тем, что при прокатке тонкой пленки длина зоны ее контакта с валком намного больше толщины пленки, и она находится в условиях гидростатического сжатия, вслед-

ствие чего сжимающее напряжение гораздо выше предела текучести при одноосном растяжении/сжатии. Для металлов это известный факт [31]. Сильный разогрев объясняет появление толстых полос и локализацию течения в одиночной пилообразной зоне текучести.

Увеличение толщины полосы сдвига происходит путем фронтального перехода неориентированного материала в полосу, а деформацией в самой полосе можно пренебречь. Сдвиговая деформация в полосе ε равна 0.78 ± 0.14 . Заметим, что это первое измерение сдвиговой деформации в полосе. Деформационное упрочнение полимера анализировалось в работе [3]. Его величина пропорциональна квадрату деформации вне зависимости от типа полимера. Квадратичный характер деформационного упрочнения подтверждается экспериментальными данными [32], но степень упрочнения не постоянна и возрастает с повышением молекулярной массы полимера.

Деформация сдвига в полосе значительно меньше, чем в шейке при растяжении, типичное значение которой для ПЭТФ составляет ~ 3.5 . Это объясняется тем, что образование шейки при растяжении связано с двумя эффектами: с уменьшением сечения образца и истинным размягчением полимера. Образование шейки при растяжении определяется уменьшением сечения, а влияние истинного деформационного размягчения мало. При прокатке полосы сдвига аналогичны шейке при растяжении. Как и шейка, они обусловлены локализацией пластического течения вследствие его неустойчивости. Как и шейка, они утолщаются фронтально, но причиной локализации является тепловое размягчение полимера в полосах сдвига. Данный эффект слабее деформационной неустойчивости, и деформация в полосе на десятичный порядок меньше, чем в шейке.

Получено решение, описывающее разогрев полосы сдвига в процессе ее утолщения. Максимальная величина разогрева определяется безразмерным параметром $z_0 = \frac{\sqrt{v}h}{2a}$, где v – скорость сдвига, h – толщина полосы, a – температуропроводность. Этот параметр равен отношению толщины полосы сдвига к размеру области прогрева за счет теплопроводности. При постоянной скорости сдвига толщина полосы пропорциональна времени деформирования.

Количественные расчеты величины разогрева (рис. 8 и 9) позволяют сделать вывод, что разогрев в полосах сдвига – специфически полимерное явление, а в металлах им можно пренебречь даже для прокатных станов со скоростью прокатки $u = 5$ м/с. Это обусловлено тем, что типичная температуропроводность металлов на два десятич-

ных порядка выше, чем полимеров. Вторая не менее важная причина – большая толщина полос. Разогрев приводит к деформационному размягчению полимера, а оно способствует локализации деформации в одной или нескольких полосах и соответственно увеличению толщины полосы. Локализация приводит к дальнейшему росту температуры до адиабатического значения. Это позволяет сделать вывод, что образование единой “пилообразной” зоны текучести [24, 25] вызвано саморазогревом полимера, вследствие чего снижается предел текучести, и образование новых полос сдвига подавляется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При прокатке аморфного ПЭТФ наблюдали появление набора пересекающихся полос сдвига. Полоса, возникшая позднее, оставалась прямой, а появившаяся раньше приобретала вид кинка. Деформация сдвига в полосе постоянна по толщине и равна $78 \pm 14\%$, что соответствует углу излома кинка $38 \pm 5^\circ$. Увеличение толщины полосы сдвига происходит путем фронтального перехода неориентированного полимера в полосу, а деформацией в самой полосе можно пренебречь.

Получено аналитическое решение, описывающее распределение температуры по толщине полосы сдвига, растущей фронтально с постоянной скоростью. Температура максимальна во фронте полосы.

При зарождении полосы разогрев невелик, и локализация течения обусловлена истинным деформационным размягчением. При прокатке с высокой скоростью механизм локализации течения ПЭТФ изменяется: наблюдается термическое размягчение и переход в высокоэластическое состояние. Разогрев в полосах сдвига – специфически полимерное явление, а в металлах им можно пренебречь. После зарождения в тонких полосах температура растет пропорционально корню квадратному из толщины полосы. При увеличении толщины максимальная температура полосы приближается к адиабатическому пределу, при котором потерями теплоты можно пренебречь.

При прокатке тонкой пленки сжимающее напряжение гораздо выше предела текучести при одноосном растяжении/сжатии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований РАН (код проекта 0082-2019-0004) в Федеральном исследовательском центре химической физики РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Broutman L.J., Patil R.S.* // Polym. Eng. Sci. 1971. V. 11. P. 165.
2. *Павлов В.В., Власов С.В., Кулезнев В.Н., Герасимов В.И., Иванов М.В.* // Высокомолек. соед. А. 1986. Т. 28. № 8. С. 1609.
3. *Ward I.M.* The Mechanical Properties of Solid Polymers. New York: Wiley, 1984.
4. *Roesler J., Harders H., Baeker M.* Mechanical Behavior of Engineering Materials. New York: Springer, 2007.
5. *Турецкий А.А., Баранов А.О., Чвалун С.Н., Ерина Н.А., Зубов Ю.А., Прут Э.В., Бакеев Н.Ф., Ениколопан Н.С.* // Высокомолек. соед. А. 1986. Т. 28. № 10. С. 2141.
6. *Марихин В.А., Мясникова Л.П., Новак И.И., Сучков В.А., Тухватуллина М.Ш.* // Высокомолек. соед. А. 1972. Т. 14. № 11. С. 2457.
7. *Акутин М.С., Афанасьев Н.В.* // Энциклопедия полимеров М.: Советская энциклопедия, 1977. Т. 3. С. 207.
8. *Raabe D., Chen N., Chen L.* // Polymer. 2004. V. 45. P. 8265.
9. *Gezovich D.M., Geil P.H.* // J. Mater. Sci. 1971. V. 6. № 6. P. 531.
10. *Lee W.B., Wu S.Z., Song M.S.* // J. Mater. Eng. Perform. 1996. V. 5. № 5. P. 637.
11. *Nakayama K., Qi K., Hu X.* // Polym. Compos. 2001. V. 9. P. 151.
12. *Govaert L.E., Van Melick H.G.H., Meijer H.E.H.* // Polymer. 2001. V. 42. № 3. P. 1271.
13. *Van Melick H.G.H., Govaert L.E., Raas B., Nauta W.J., Meijer H.E.H.* // Polymer. 2003. V. 44. № 4. P. 1171.
14. *Raabe D., Chen N., Chen L.* // Polymer. 2004. V. 45. P. 8265.
15. *Jia J., Raabe D., Mao W.M.* // Chinese J. Polym. Sci. 2006. V. 24. P. 403.
16. *Yang Y., Keum J., Zhou Z., Thompson G., Hiltner A., Baer E.* // J. Appl. Polym. Sci. 2010. V. 118. № 2. P. 659.
17. *Serenko O.A., Efimov A.V., Nasrullaev I.N., Obolonkova E.S., Volynskii A.L., Bazhenov S.L.* // Polymer Science A. 2003. V. 45. № 8. P. 773.
18. *Efimov A.V., Nedorezova P.M., Bazhenov S.L., Palaznik O.M., Grokhovskaya T.E., Polschikov S.V.* // Polymer Science A. 2020. V. 62. № 3. P. 260.
19. *Keчек'yan P.A., Bazhenov S.L., Keчек'yan A.S.* // Polymer Science A. 2018. V. 60. № 3. P. 373.
20. *Monakhova K.Z., Bazhenov S.L., Keчек'yan A.S.* // Polymer Science A. 2019. V. 61. № 4. P. 499.
21. *Nielsen L.* Mechanical Properties of Polymers and Composites. New York: Marcel Dekker, 1974.
22. *Качанов Л.М.* Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. С. 420.
23. *Стрельников И.А., Мазо М.А., Балабаев Н.К., Олейник Э.Ф., Берлин А.А.* // Докл. РАН. 2014. Т. 457. № 2. С. 193.

24. *Volynskii A.L., Sosnovskii I.V., Rukhlya E.G., Bolshakova A.V., Efimov A.V., Bazhenov S.L., Bakeev N.F.* // Dokl. Phys. Chem. 2014. V. 458. P. 158.
25. *Bazhenov S.L., Efimov A.V., Sosnovskii I.V., Bol'shakova A.V., Kechek'yan A.S., Volynskii A.L.* // Polymer Science A. 2015. T. 57. № 4. С. 425.
26. *Bazhenov S.L., Sosnovskii I.V., Kechek'yan A.S.* // Dokl. Phys. Chem. 2020. V. 492. № 1. P. 57.
27. *Godovsky Y.K.* Thermophysical Properties of Polymers, Berlin: Springer, 1993.
28. *Чумаевский А.В.* Дис. ... канд. техн. наук. Томск: Томский гос. ун-т, 2014. С. 27.
29. *Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И.* Интегралы и ряды. М.: Физматлит, 2003. Т. 1. С. 115.
30. *Bazhenov S.* // J. Appl. Polym. Sci. 2011. T. 119. № 2. С. 654.
31. *Целиков А.И.* Основы теории прокатки. М.: Металлургия, 1965.
32. *Тун'кин I.V., Bazhenov S.L., Efimov A.V., Kechek'yan A.S., Timan S.A.* // Polymer Science A. 2011. T. 53. № 8. С. 715.