

УДК 678.01:53

ТЕПЛООБРАЗОВАНИЕ В ПОЛИМЕРАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ  
ВИБРАЦИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ

В. Т. Фаерман

Процесс нагревания полимерного образца под действием многократной деформации низкой звуковой частоты был предметом изучения в работе [1]. Выявление зон стационарного разогрева в этом случае имеет большое значение для выбора режима эксплуатации полимерного материала.

Не менее интересен анализ теплообразования в полимерах под действием вибраций ультразвуковой частоты в связи с широким практическим применением этого явления для соединения термопластичных полимерных образцов [2—4].

Ультразвуковой способ соединения термопластичных масс был предложен Ольшанским и Мордвинцевой [5] и состоит в том, что на полимерные образцы 1 (рис. 1) воздействуют нормальные механические напряжения торца волновода 2, вибрирующего с частотой 20 кгц и амплитудой колебаний до 50 мк, возбуждаемые магнитострикционным преобразователем 3.

Особенность нагревания полимерных образцов при помощи ультразвуковых вибраций состоит в том, что наиболее интенсивное теплообразование происходит на границе раздела соединяемых образцов. Это можно объяснить тем, что при каждом цикле деформации необратимо затрачивается работа, которая превращается в теплоту и выделяется в деформируемых образцах, а на границе раздела образцов имеет место дополнительное тепловыделение, обусловленное взаимодействием микронеровностей соприкасающихся поверхностей. В результате интенсивного нагревания в пограничном слое полимер из стеклообразного состояния переходит в высокоэластическое, а затем в вязко-текущее состояние. В этот момент полимерным образцам можно придать требуемую форму и соединить друг с другом.

В рассматриваемом процессе, протекающем практически в очень короткий промежуток времени, важно оценить время действия ультразвуковых колебаний, так как именно эта величина при прочих равных условиях определяет прочность соединения.

В данной работе проведен анализ теплообразования на границе раздела образцов и предложен метод расчета длительности цикла для получения плотного соединения полимеров.

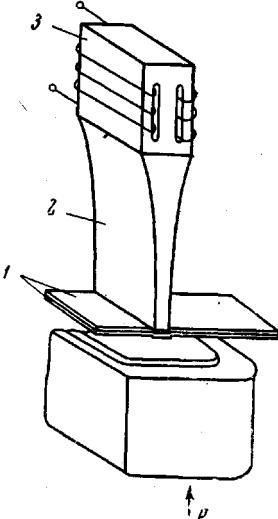


Рис. 1. Схема ультразвукового устройства для соединения полимерных материалов. Пояснения — см. текст

## Экспериментальная часть

Рассмотрим систему с внутренним источником теплоты. Будем считать, что тепловой поток вследствие теплопроводности материала распространяется в одном направлении и количество теплоты, выделяющееся в единице объема вещества за единицу времени — постоянно. Дифференциальное уравнение теплопроводности в этом случае можно записать в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \frac{G}{C_p \rho}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент температуропроводности;  $C_p$  — теплоемкость при постоянном давлении;  $\rho$  — плотность среды;  $G$  — интенсивность теплообразования.

Проанализируем процесс нагревания двух термоэластичных полимерных образцов (пластин) под действием вибраций ультразвуковой частоты. При малом времени воздействия волна не нагревается, поэтому можно считать, что температура торца волновода остается постоянной, а теплофизические свойства полимерного материала не зависят от температуры. Выбрав начало координат на поверхности соприкосновения двух пластин, получим следующие граничные условия:

$$T(x, 0) = T(\pm a, t) = T_i, \quad (2)$$

где  $a$  — толщина пластины.

Карслуу и Егер [6] приводят решение, удовлетворяющее этим граничным условиям:

$$\Delta T = \frac{Ga^2}{2K} \left\{ 1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=0,1,2}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^3} \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2a} \exp \left[ -(2n+1)^2 \pi^2 \frac{\Phi}{4} \right] \right\}, \quad (3)$$

где

$$\Phi = \frac{at}{a^2} \quad (4)$$

$\Phi$  — безразмерное время;  $K$  — коэффициент теплопроводности;  $t$  — время цикла соединения образцов.

При  $x = 0$  температура на поверхности раздела равна:

$$\Delta T = \frac{a^2 G}{2K} \left\{ 1 - \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^3} \exp \left[ -(2n+1)^2 \pi^2 \frac{\Phi}{4} \right] \right\}, \quad (5)$$

где  $\Delta T$  — температура нагрева полимерного образца до вязко-текучего состояния.

Для упрощения расчетов величины  $t$  целесообразно представить уравнение (5) в виде:

$$\frac{K \Delta T}{a^2 G} = f(\Phi) = f\left(\frac{at}{a^2}\right) \quad (6)$$

и воспользоваться расчетным графиком зависимости (6), приведенным в работе [7].

## Обсуждение результатов

Величину  $G$ , входящую в (6), определим из следующих соображений. Будем считать, что торец волновода является источником плоской звуковой волны, распространяющейся в полимерных образцах. Такое допущение может быть приемлемо в том случае, если размер торца волновода соизмерим с длиной звуковой волны в полимере, причем образцы должны находиться в непосредственной близости от источника колебаний. Запишем выражение для интенсивности плоской звуковой волны [8]

$$I = \bar{E}C = \frac{1}{2} \rho C \omega^2 A^2 = 2\pi^2 \rho C f^2 \cdot \xi^2, \quad (7)$$

где  $C$  — скорость звука в полимере,  $\rho$  — плотность полимера,  $f$  — частота колебаний,  $\xi$  — амплитуда колебаний.

Легко видеть, что интенсивность теплообразования в системе пластина — пластина записывается:

$$G = \frac{I}{2a} = \frac{\pi^2 \rho C f^2 \xi^2}{a}. \quad (8)$$

Таким образом, зная  $G$ ,  $\Delta T$  и другие величины, входящие в левую часть выражения (6), можно рассчитать значение  $K\Delta T / a^2 G$  и по рис. 2 (пунктирная часть кривой — интерполяция автора) найти величину  $\Phi$ , а затем по формуле (4) найти время цикла соединения

$$t = \frac{a^2 \Phi}{a}. \quad (9)$$

Результаты вычислений для различных полимерных образцов приведены в таблице.

Из таблицы следует, что для полиэтиленовых (ПЭ) и полиамидных (ПА) образцов толщиной 0,006 см при амплитуде колебаний  $\xi = 13$  и 16 мк не удалось определить величину  $\Phi$ , а следовательно, время цикла. Это свидетельствует о том, что при малых  $\xi$  тепловыделение в тонких пленках незначительно,

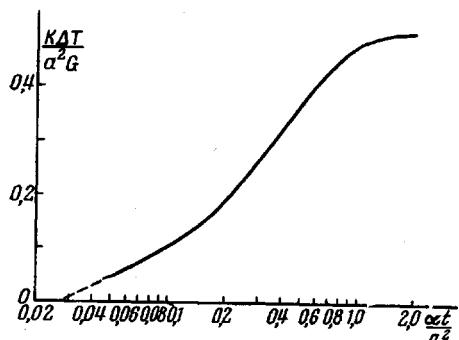


Рис. 2. График зависимости  $K\Delta T / a^2 G$  от  $a^2 / a^2$

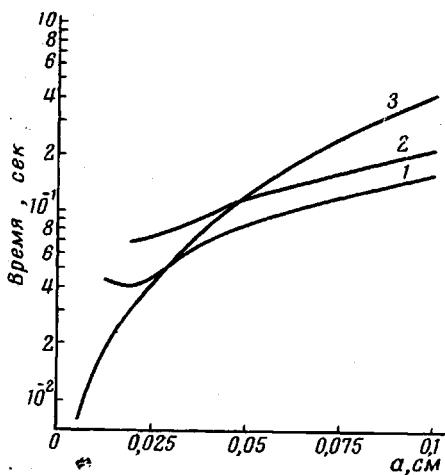


Рис. 3. Зависимость времени цикла от толщины образца при  $\xi = 13$  мк; 1 — ПЭ, 2 — ПА (нейлон); 3 — ПЭТФ

и в этой связи не имеет смысла применять ультразвуковые вибрации для соединения тонких пленок ПЭ и ПА.

Увеличение амплитуды колебаний приводит к росту интенсивности теплообразования и уменьшению времени цикла при прочих равных условиях.

На рис. 3 представлена зависимость времени цикла  $t = f(a)$  от толщины соединяемых образцов для разных полимеров при  $\xi = 13$  мк. Общим является увеличение времени цикла с увеличением толщины образца. Исключение составили образцы ПЭ толщиной 0,013—0,020 см. Время цикла при прочих равных условиях зависит от химической и физической природы полимера:  $t_{\text{ПЭТФ}} > t_{\text{ПА}} > t_{\text{ПЭ}}$ .

Интересно отметить, что тонкие образцы полиэтилентерефталата (ПЭТФ) (кривая 3) способны соединяться при помощи ультразвуковых вибраций при  $\xi = 13$  мк в отличие от образцов ПА (кривая 2) и ПЭ (кривая 1).

Результаты расчета показывают, что время цикла для образцов толщиной выше 0,006 см лежит в пределах от сотых до десятых долей секунды. Если учесть, что с помощью ультразвуковых вибраций достигнута скорость

Продолжительность цикла соединения для образцов полимера под действием  
ультразвуковых вибраций

$\xi$ , мк	$J$ , кал/сек·см <sup>2</sup>	$a$ , см	$G$ , кал/сек·см <sup>3</sup>	$K\Delta T/a^2G$	$\Phi$	$t$ , сек	
<b>Полиэтилен</b>							
$\Delta T = 155^\circ$ ; $K = 1,23 \cdot 10^{-3}$ кал/см·сек, $^\circ\text{C}$ ; $\alpha = 3,56 \cdot 10^{-3}$ см <sup>2</sup> /сек; $C = 1,84 \cdot 10^5$ см/сек)							
16	95,60	0,006	7 967	0,66500	—	—	
		0,013	3 676	0,30690	$3,7 \cdot 10^{-1}$	0,018	
		0,020	2 390	0,19970	$2,1 \cdot 10^{-1}$	0,024	
		0,035	1 365	0,11400	$1,1 \cdot 10^{-1}$	0,038	
		0,100	478,0	0,03988	$4,5 \cdot 10^{-2}$	0,126	
20	149,4	0,006	1245,10	0,42540	$7,0 \cdot 10^{-1}$	0,007	
		0,013	5 746	0,19630	$2,1 \cdot 10^{-1}$	0,010	
		0,020	3 735	0,12760	$1,275 \cdot 10^{-1}$	0,014	
		0,035	2 134	0,07296	$7,0 \cdot 10^{-2}$	0,024	
		0,100	747,0	0,02552	$3,8 \cdot 10^{-2}$	0,107	
25	233,4	0,006	194 510	0,27230	$3,1 \cdot 10^{-1}$	0,003	
		0,013	8 978	0,12580	$1,25 \cdot 10^{-1}$	0,006	
		0,020	5 835	0,03168	$7,7 \cdot 10^{-2}$	0,009	
		0,035	3 334	0,04668	$5,0 \cdot 10^{-2}$	0,017	
		0,100	1 167	0,01634	$3,35 \cdot 10^{-2}$	0,094	
30	336,0	0,006	28 000	0,18910	$1,95 \cdot 10^{-1}$	0,002	
		0,013	12 923	0,03729	$8 \cdot 10^{-2}$	0,004	
		0,020	8 400	0,05674	$5,6 \cdot 10^{-2}$	0,006	
		0,035	4 800	0,03242	$4,1 \cdot 10^{-2}$	0,014	
		—	1 680	0,01135	$3,2 \cdot 10^{-2}$	0,090	
<b>Полиамид</b>							
$(\Delta T = 240^\circ$ ; $K = 8 \cdot 10^{-4}$ кал/см·сек, $^\circ\text{C}$ ; $\alpha = 3,32 \cdot 10^{-3}$ см <sup>2</sup> /сек; $\rho = 1,13$ г/см <sup>3</sup> ; $C = 1,45 \cdot 10^5$ см/сек)							
16	75,12	0,006	6 260	0,8519	—	—	
		0,013	2 889	0,3933	$5,8 \cdot 10^{-1}$	0,0259	
		0,020	1 878	0,2557	$2,8 \cdot 10^{-1}$	0,035	
		0,035	1 073	0,1461	$1,475 \cdot 10^{-1}$	0,037	
		0,100	375,6	0,0511	$5,2 \cdot 10^{-2}$	0,181	
20	117,4	0,006	9 783	0,5451	—	—	
		0,013	4 515	0,2516	$2,75 \cdot 10^{-1}$	0,014	
		0,020	2 935	0,1635	$1,7 \cdot 10^{-1}$	0,021	
		0,035	1 677	0,0938	$8,7 \cdot 10^{-2}$	0,039	
		0,100	587,0	0,0327	$4,1 \cdot 10^{-2}$	0,136	
25	183,4	0,006	15 283	0,3492	$3,9 \cdot 10^{-1}$	0,004	
		0,013	7 054	0,1611	$1,675 \cdot 10^{-1}$	0,009	
		0,020	4 585	0,1047	$1 \cdot 10^{-1}$	0,012	
		0,035	2 620	0,0598	$6,0 \cdot 10^{-2}$	0,022	
		0,100	917,0	0,0209	$3,55 \cdot 10^{-2}$	0,107	
30	264,1	0,006	22 003	0,2423	$2,62 \cdot 10^{-1}$	0,003	
		0,013	10 157	0,1118	$1,05 \cdot 10^{-1}$	0,005	
		0,020	6 602	0,0727	$7,1 \cdot 10^{-2}$	0,009	
		0,035	3 773	0,0415	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,017	
		0,100	1 320	0,0145	$3,3 \cdot 10^{-2}$	0,099	
<b>ПЭТФ</b>							
$(\Delta T = 240^\circ$ ; $K = 3,36 \cdot 10^4$ кал/см·сек, $^\circ\text{C}$ ; $\alpha = 7,5 \cdot 10^{-4}$ см <sup>2</sup> /сек; $\rho = 1,38$ г/см <sup>3</sup> ; $C = 3,32 \cdot 10^5$ см/сек)							
16	210,2	0,006	17 517	0,1279	$1,275 \cdot 10^{-1}$	0,006	
		0,013	8 036	0,05899	$5,8 \cdot 10^{-2}$	0,013	
		0,020	5 255	0,03836	$4,5 \cdot 10^{-2}$	0,024	
		0,035	3 002	0,02194	$3,6 \cdot 10^{-2}$	0,059	
		0,100	1 051	0,007673	$3,0 \cdot 10^{-2}$	0,399	
20	328,4	0,006	27 375	0,03183	$7,8 \cdot 10^{-2}$	0,004	
		0,013	12 630	0,03779	$4,4 \cdot 10^{-2}$	0,010	
		0,020	8 210	0,02456	$3,7 \cdot 10^{-2}$	0,020	
		0,035	4 691	0,01403	$3,3 \cdot 10^{-2}$	0,054	
		0,100	1 642	0,004911	$2,9 \cdot 10^{-2}$	0,386	

Продолжение таблицы

$\xi, \text{мк}$	$J, \text{кал}/\text{сек} \cdot \text{см}^2$	$a, \text{см}$	$G, \text{кал}/\text{сек} \cdot \text{см}^2$	$K\Delta T/a^2G$	$\Phi$	$t, \text{сек}$
<b>ПЭ Т Ф</b>						
			$(\Delta T = 240^\circ; K = 3,36 \cdot 10^{-4} \text{ кал}/\text{см} \cdot \text{сек}, {}^\circ\text{C}; \alpha = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{сек}; \rho = 1,33 \text{ г}/\text{см}^3;$			
			$C = 3,3210^6 \text{ см}/\text{сек})$			
25	513,1	0,006 0,013 0,020 0,035 0,100	42 758 19 735 12 828 7 330 2 565	0,05256 0,02419 0,01572 0,008930 0,003144	$5,3 \cdot 10^{-2}$ $3,7 \cdot 10^{-2}$ $3,35 \cdot 10^{-2}$ $3,05 \cdot 10^{-2}$ $2,85 \cdot 10^{-2}$	0,002 0,003 0,018 0,050 0,380
30	739,0	0,006 0,013 0,020 0,035 0,100	61 583 28 423 18 475 10 557 3 695	0,03638 0,01679 0,01091 0,006237 0,002184	$4,3 \cdot 10^{-2}$ $3,35 \cdot 10^{-2}$ $3,16 \cdot 10^{-2}$ $2,95 \cdot 10^{-2}$ $2,7 \cdot 10^{-2}$	0,002 0,007 0,017 0,048 0,360

соединения, например, ПЭ-пленок от 3 до 30 м/мин, что соответствует времени цикла 0,05—0,5 сек., то расчетные величины совпадают по порядку с экспериментально полученными [9, 10].

В заключение автор выражает благодарность И. П. Голяминой за ценные советы при обсуждении работы.

### Выходы

- Проведен анализ теплообразования в термопластичных полимерных образцах под действием ультразвуковых вибраций.
- Увеличение амплитуды колебаний приводит к росту интенсивности теплообразования и к уменьшению времени цикла соединения.
- Увеличение толщины образца вызывает увеличение времени цикла соединения полимерных образцов.

Калининский научно-исследовательский  
институт текстильной промышленности

Поступила в редакцию  
17 VI 1968

### ЛИТЕРАТУРА

- С. Б. Ратнер, В. И. Коробов, Докл. АН СССР, 161, 824, 1965.
- H. Deans, Mod. Plastics, 38, 95, 1961.
- T. Seagrap. Plastic. Technol., 8, 22, 1962.
- В. Т. Фаерман, В. В. Корзин, Н. С. Александров, М. Я. Горфинкель, И. С. Куклицкий, Л. Г. Груздова Авт. свид. 230544; Бюлл. изобретений, 1968, № 34.
- Н. А. Ольшанский, А. В. Мордвинцева, Авт. свид. СССР № 122866; Бюлл. изобретений, 1959, № 19.
- Г. Карслуу, Д. Егер, Теплопроводность твердых тел, изд-во «Наука», 1964, стр. 130.
- Э. Берихардт, Переработка термопластичных материалов, Госхимиздат, 1962, стр. 104.
- Л. Бергман, Ультразвук и его применение в науке и технике, Изд-во иностран. лит., 1957, стр. 15.
- R. Pohlman, Industrie Anzeiger, 85, 110, 1963.
- I. A. Radtord, Package Engin, 8, 54, 1963.

### HEAT GENERATION IN POLYMER AT ULTRASONIC ACTION

V. T. Faterman

#### Summary

Method for calculation of time of welding of thermoplastic polymers ( $t$ ) at ultrasonic action has been proposed. Parameter  $t$  depends on sample thickness, parameters of ultrasonic field and thermal constants of the polymer.