

необходимо определенное время. При проведении второй стадии термофиксации (ТФ-2) двухосноориентированных пленок ε существенно снижается (см. рис. 3, кривые 5, 6). Следует отметить, что усадка таких пленок в продольном (машинном) направлении колеблется от $\pm 0,5$ примерно до 1%, что обеспечивает ее применение в различных областях техники.

После снятия остаточных напряжений (после ТФ-2) должно наблюдаться некоторое уменьшение прочности, особенно в направлении максимальной ориентации цепей макромолекул. Так, релаксация наиболее напряженных участков цепей ПЭТФ приводит к определенному перераспределению уровня ориентации пленки в обоих направлениях (см. рис. 1, кривые 5,6). Пленка становится более «балансной» по прочности. Прочность пленок после ориентации и термофиксации будет в 1,5—2 раза выше прочности пленок без ТФ-1. Одновременно пленки будут обладать повышенной стабильностью геометрических размеров при высоких температурах эксплуатации. Анализ результатов испытаний пленок, прошедших стадию второй термофиксации в нестандартных условиях, применяемых для оценки свойств магнитных лент и пленок (температура испытания — 100°C), показал, что ε пленок при вытяжке в обоих направлениях не превышает 0.

Таким образом, комбинирование известных методов ориентации с чередующимися термофиксацией, термоотжигом и другими стадиями при использовании традиционных способов технологии обеспечивает получение пленок, обладающих улучшенными физико-механическими свойствами.

Литература

1. Чейфери А., Уорд И. Сверхвысокомолекулярные полимеры. Пер. с англ. Под ред. А. Я. Малкина. Л., «Химия», 1983.
2. Кулезнев В. Н., Власов С. В. В сб.: Свойства и применение пленочных материалов. М., НПО «Пластик», 1983, с. 128.
3. Андрианов Н. В. и др. Пласт. массы, 1968, № 3, с. 47.
4. Пат. США 3052924.
5. Пат. США 4042569.
6. Брух А. и др. Высокомол. соед., 1982, т. АХХIV, № 5, с. 939.
7. Занегин В. Д., Герасимов В. И. Высокомол. соед., 1981, т. АХХIII, № 5, с. 1147.

УДК 678.072.027.77

Оптимизация режима литьевого прессования изделий из реактопластов

В. П. СТАВРОВ, В. М. ТКАЧЕВ, В. В. МУЛЛИН

Литьевое прессование является распространенным методом изготовления изделий из реактопластов. Несмотря на низкую по сравнению с литьем под давлением производительность и повышенный расход пресс-материала, этот метод применяют в производстве высокоточных изделий сложной конфигурации [1]. Недостатки метода в значительной степени могут быть устранены путем оптимизации (по экономическим показателям) режима формования.

Исследование и описание реологических свойств реактопластов на стадии формования изделий [2, 3] позволило разработать методы расчета основных технологических параметров литья под давлением [2] и прямого прессования изделий [3—5]. Метод оптимизации режима литьевого прессования предусматривает использование упрощенных уравнений состояния, результатов аттестационной проверки пресс-формы и технологических испытаний пресс-материала.

Основными технологическими параметрами процесса литьевого

прессования являются масса навески, температура пресс-формы, усилие формования, продолжительность выдержки изделия в форме. С целью сокращения расхода пресс-материала масса навески должна быть снижена до минимума. Минимальная масса навески определяется допустимым усилием формования, поскольку уменьшение толщины слоя в тигле связано с увеличением усилия формования. Повышение усилия формования способствует сокращению времени заполнения пресс-формы, однако при этом возрастает износ поверхности пуансона и матрицы. Кроме того, максимально допустимое усилие формования может определяться размыканием пресс-формы по плоскости разреза [6]. Для сокращения времени выдержки изделия в пресс-форме целесообразно повышать температуру формы, однако при этом ускоряется отверждение пресс-материала; ухудшается внешний вид получаемого изделия, а также, как правило, требуется более высокое усилие формования. С экономической точки зрения оптимальный режим прессования должен обеспечивать снижение до минимума расхода материала, усилия прессования и времени выдержки в пресс-форме при заданном качестве изделий [7].

Свойства пресс-материала зависят от параметров процесса формования. Приближенное представление этих зависимостей возможно с помощью упрощенных уравнений состояния.

Предположим, что касательные напряжения пропорциональны усилию формования (F) и толщине слоя пресс-материала в тигле (h). Тогда для скорости истечения пресс-материала из тигля получим уравнение (1), где M — масса материала в тигле; S — площадь пуансона (в плане); μ — коэффициент вязкости; K — коэффициент пропорциональности, зависящий от размеров тигля и литника.

Величина μ является в общем случае функцией температуры и времени (или степени) отверждения пресс-материала, которую можно представить в виде формулы (2), где θ — температура пресс-материала; θ_0 — температура испытаний; μ_0 — коэффициент вязкости при θ_0 ; a и b — коэффициенты, определяемые экспериментально.

Решение уравнения (1) при переменной температуре $\theta(\tau)$ достаточно сложно. При постоянной температуре $\theta(\tau) = \theta$ и постоянном F после интегрирования уравнения (1) с учетом формулы (2) получим выражение (3), где M_n — начальная масса материала в тигле (масса навески); M_0 — масса остатка в тигле; τ_n — время формования изделия (время течения пресс-материала).

Трансцендентное уравнение (3) связывает между собой основные параметры процесса литьевого прессования: M_n , F , τ_n и θ . Для его однозначного решения (хотя бы численного) необходимо записать еще три соотношения между искомыми параметрами, а также задать значение M_0 , зависящее от конструкции пресс-формы и величины F . Предположим, что параметры μ_0 , a и b известны из результатов технологических испытаний.

Рассмотрим состояние пресс-материала в тигле в момент окончания течения как состояние равновесия идеально пластичного тела с пределом текучести (σ_T). Давление на входе в литниковое отверстие зависит от сопротивления литниковой системы и давления в оформляющей полости. Для его расчета необходимо знать распределение касательных напряжений и давлений в литниковой системе и оформляющей полости пресс-формы. Из-за сложной геометрии каналов и полостей расчет давления нецелесообразен. Определив экспериментальным путем усилие, необходимое для качественного оформления изделия, и усилие, при котором начинается размыкание пресс-формы, с использованием известных технологических параметров можно рассчитать нижнее (F_*) и верхнее (F^*) усилия формования.

Из условия равновесия материала в литьевой форме выражение для расчета F_* можно представить в виде уравнения (4), где p_* — минимальное давление прессования [3, 4], необходимое для получения плотного и прочного материала; A_* и B_* — коэффициенты, определяемые экспериментально; $C = 2/3(2R - 3r_0)S$; R — радиус тигля; r_0 — радиус литникового отверстия; h_0 — толщина слоя материала, остающегося в тигле.

В случае гидростатической передачи давления из тигля в оформляющую полость условие размыкания пресс-формы примет вид: $S_n \geq S$, где S_n — площадь (в плане) оформляющей полости и литниковой системы. Из-за потери давления в тигле, литниковой системе и оформляющей полости размыкание пресс-формы происходит при усилении больше $F' = p_0 S_n$, где p_0 — давление на входе в литниковое отверстие. Поскольку потери давления в литниковой системе зависят в первую очередь от σ_T пресс-материала, усилие размыкания можно рассчитать по выражению (5). Достаточно надежно значения A^* и B^* можно определить лишь опытным путем.

Параметр σ_T , входящий в формулы (4), (5), как и μ_0 , является функцией температуры и степени (или времени) отвержде-

ния. Эта функция может быть аппроксимирована уравнением (6), где σ_T, a', b' — параметры, определяемые экспериментально.

Оптимальную величину F получим, приравняв нижнее и верхнее максимальное его значение: $F_{\text{опт}} = F_* = F^*$. В данном случае обеспечивается наиболее быстрое заполнение пресс-формы, качественное оформление изделия при минимальном остатке пресс-материала в тигле. При этом, приравняв правые части выражений (4) и (5), получим формулу (7) для расчета h_0 . Масса пресс-материала, остающегося в тигле, равна $M_0 = Sh_0\rho$, где ρ — плотность пресс-материала. Тогда масса навески составит: $M_H = \rho(V + Sh_0 + M'_0)$, где V — объем литников и оформляющей полости пресс-формы; M'_0 — масса пресс-материала, вытекающего в зазоры.

Параметр σ_T , входящий в формулы (5) и (7), зависит, согласно выражению (6), от температуры и времени. После подстановки выражения (6) в формулу (5), а затем в формулу (3) получим трансцендентное уравнение относительно θ и τ_T , решение которого достаточно сложно. Упростить определение оптимального τ_T и соответствующего ему F можно следующим образом. Предположим, что коэффициенты B_* и B^* , учитывающие сопротивление литников и оформляющей полости, равны, поскольку σ_T пресс-материала практически не зависит от давления. Тогда формула (7) с учетом выражения (6) преобразуется в уравнение (8).

При заданной θ из выражения (8) получим формулу (9) для расчета τ_T . Подставив в выражение (4) принятое значение θ и величину τ_T , найденную по формуле (9), получим формулу (10) для расчета $F_{\text{опт}}$.

$$\frac{dM}{d\tau} = -\frac{KFM}{S\mu} \quad (1)$$

$$\mu(\tau) = \mu_0 e^{a\tau} e^{b[\theta_0 - \theta(\tau)]} \quad (2)$$

$$\ln \frac{M_H}{M_0} = \frac{KE}{Sa\mu_0} (1 - e^{-a\tau_T}) e^{-b[\theta_0 - \theta(\tau_T)]} \quad (3)$$

$$F_* = A_* p_* + B_* \sigma_T + C_* \frac{\sigma_T}{h_0} \quad (4)$$

$$F^* = A^* + B^* \sigma_T \quad (5)$$

$$\sigma_T(\tau) = \sigma'_T e^{a'\tau} e^{b'[\theta_0 - \theta(\tau)]} \quad (6)$$

$$h_0 = C_* \sigma_T [A^* - A_* p_* + \sigma_T (B^* - B_*)]^{-1} \quad (7)$$

$$h_0 = \frac{C_* \sigma'_T}{A^* - A_* p_*} e^{a'\tau_T} e^{b'(\theta_0 - \theta)} \quad (8)$$

$$\tau_T = \frac{1}{a'} \left[\ln \frac{h_0 (A^* - A_* p_*)}{C_* \sigma'_T} - b'(\theta_0 - \theta) \right] \quad (9)$$

$$F_{\text{опт}} = \frac{Sa\mu_0}{K} \ln \frac{M_H}{M_0} e^{b(\theta_0 - \theta)} (1 - e^{-a\tau_T})^{-1} \quad (10)$$

В формулы (9) и (10), помимо заданной θ входят параметр h_0 . Следовательно, необходимо задать его величину или вывести соотношение для ее расчета. Целесообразно принимать значения h_0 в диапазоне 0,5—2 мм в зависимости от конструкции пресс-формы и массы изделия. Оптимальное значение h_0 находят по ординате точки перехода кривой зависимости $h_0 - F$ в горизонтальную линию. Таким образом, оптимальные значения θ и h_0

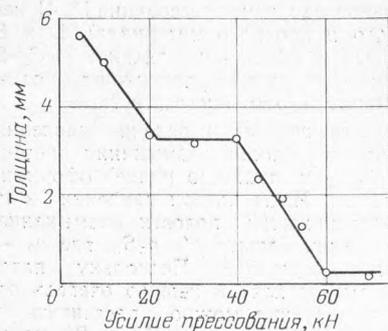


Рис. 1. Зависимость толщины слоя пресс-материала в тигле от усилия прессования.

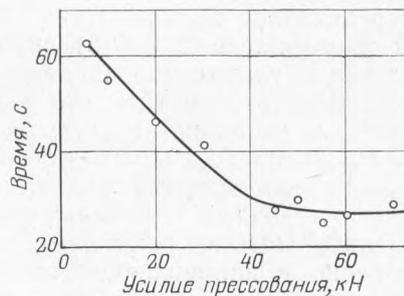


Рис. 2. Зависимость времени истечения пресс-материала из тигля от усилия прессования.

задают в соответствии с экспериментальными данными, а τ_T и F рассчитывают по формулам (9) и (10) с использованием результатов технологических испытаний. Время выдержки изделия в пресс-форме определяют по той же методике, что и при прямом прессовании [4].

Коэффициенты K, A_*, A^*, B_* и B^* , а также параметры S и V входящие в формулы для расчета оптимального режима формования, находят в процессе аттестационной проверки пресс-формы при пуске ее в эксплуатацию после изготовления или ремонта. Для этого осуществляют формование изделий из двух партий пресс-материала (или пресс-материалов различных марок), значения σ_T и μ которых при 150 и 170 °С различаются не менее чем в 1,5 раза. Технологические параметры определяют по известной методике [4]. Проведя несколько опытных запрессовок, предварительно выбирают M_H, θ и F , обеспечивающие изготовление изделий в соответствии с предъявляемыми требованиями. По результатам опытных запрессовок находят величину M_H , при которой h_0 составляет 2—5 мм. Затем из материала каждой партии формируют изделия при 10 значениях F , которые задают такими, чтобы интервал между ними был примерно равным; h_0 при 2—3 нижних значениях F была больше выбранной, а при 2—3 верхних значениях F происходило размыкание формы (при этом h_0 меньше заданной).

В процессе формования измеряют τ_T пресс-материала от момента приложения усилия и начала течения до момента окончания течения, когда перемещение пуансона за 5 с не превышает 0,1 мм. Взвешивают пресс-материал, заполнивший литниковую систему и оформляющую полость пресс-формы, измеряют h_0 . Значения h_0 и F наносят на график (рис. 1). Зависимость между ними аппроксимируют отрезками прямых. По точкам их пересечения находят F_* и F^* .

Значения F_*, F^* и технологических параметров для каждой партии пресс-материала подставляют в уравнения (4) и (5). Из полученных таким образом систем алгебраических уравнений вычисляют коэффициенты A_*, B_*, A^*, B^* . Для четырехгнездной пресс-формы, предназначенной для изготовления изделий массой 5,5 г с толщиной стенки до 3,5 мм, $A_* = 9,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, B_* = 1,13 \cdot 10^{-1} \text{ м}^2, A^* = 32,3 \text{ кН}, B^* = 2,04 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ (см. рис. 1). По зависимости τ_T от F (рис. 2) определяют величину τ_T при F^* . Затем рассчитывают коэффициент K по формуле: $K = S\mu/F^*\tau_T$, где μ — коэффициент вязкости пресс-материала при температуре формования, рассчитанный по результатам технологических испытаний с помощью формулы (2). В данном случае $S = 7,07 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, \mu = 12,1 \text{ МПа} \cdot \text{с}, \tau_T = 30 \text{ с}$. Следовательно, $K = 7,1 \cdot 10^{-3}$.

Коэффициенты a и b температурно-временной зависимости σ_T рассчитывают по результатам технологических испытаний с помощью формул: $a = (1/\tau_{\text{отв}}) \ln(\sigma_{0,9}/\sigma_0)$; $b = (1/20) \ln(\sigma_{0170}/\sigma_{0150})$, где σ_0 — предел текучести материала при температуре испытания (150 или 170 °С), более близкой к температуре формования; $\sigma_{0,9}$ — предел текучести стекловолонита при степени отверждения 0,9, равный 13,5 МПа [3, 4]; $\tau_{\text{отв}}$ — время отверждения материала при θ_0 ; $\sigma_{0150}, \sigma_{0170}$ — предел текучести материала при 150 и 170 °С соответственно. Для партии экструдированного пресс-материала марки АГ-4В, из которого в дальнейшем формовали изделия, $a = 7,6 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}; b = -7,6 \cdot 10^{-3} (\text{°C})^{-1}$.

Оптимальные технологические параметры, найденные по предложенной методике, составляют: $M_H = 7,6 \text{ г}; F_{\text{опт}} = 65,5 \text{ кН}; \tau_T = 60 \text{ с}; \tau_{\text{отв}} = 1,5 \text{ мин}; \theta = 170 \text{ °С}$.

Использование предложенной методики определения оптимального режима литьевого прессования обеспечивает сокращение расхода пресс-материала на 10—30%, времени формования — на 5—15% при заданном качестве изделий. Затраты на аттестационную проверку пресс-форм и технологические испытания компенсируются экономией пресс-материалов и снижением трудозатрат на изготовление изделий.

Литература

1. Брагинский В. А. Технология прессования точных деталей из терморезистивных пластмасс. Л., «Химия», 1971.
2. Леонов А. И., Басов Н. И., Казанков Ю. В. Основы переработки реактопластов и резин методом литья под давлением. М., «Химия», 1977.
3. Ставров В. П., Дедюхин В. Г., Соколов А. Д. Технологические испытания реактопластов. М., «Химия», 1982.
4. Ставров В. П. и др. Пласт. массы, 1980, № 6, с. 37.
5. Ставров В. П. и др. Пласт. массы, 1983, № 3, с. 39.
6. Авт. свид. 1158899; опубл. в Б.И., 1985, № 20.
7. Ставров В. П. Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн., 1981, № 4, с. 56.

УДК 678.072.022.72

Расчет давления компрессионного прессования изделий из реактопластов

Г. И. КИРЕЕВ

Для получения высококачественных изделий из реактопластов прессованием необходимо обеспечить выбор оптимальных технологических параметров: давления прессования, времени формования, температуры пресс-формы. Известны методы расчета давления формования изделий без предварительного нагрева таблеток реактопластов [1], времени формования изделий из реактопластов в процессе прессования [2], а также общие правила по выбору температуры пресс-формы [3]. В настоящее время среднестатистические данные по удельному давлению прессования различных пресс-материалов систематизированы [4] и используются для определения усилия прессования и типа пресса при освоении производства изделий. Однако усилие пресса, необходимое для изготовления изделий из реактопластов и рассчитанное по давлению прессования, не отличается высокой точностью, так как при расчете не учитываются реологические характеристики производственных партий пресс-материалов и геометрические размеры изделий (их высота и толщина). Соотношение между объемным расходом (Q) в кольцевом зазоре и перепадом давления (Δp) для случая изотермического течения несжимаемой жидкости под действием давления было предложено определять по уравнению (1), где R_0, R_1 — наружный и внутренний радиусы кольцевого зазора, м; $K=R_1/R_0$; $S=1/n$, n — показатель степени в степенном уравнении течения; m — коэффициент консистенции, Па·с; l — высота (длина) кольцевого зазора; $F(n, k)$ — функция, доля $0,4 \leq K \leq 1$, не зависящая от индекса течения n , при $K \rightarrow 1$ и $F \rightarrow 1$ [6]. Путем совместного решения уравнений (2) и (3), где $\bar{R}=(R_1+R_0)/2$, $\Delta R=R_0-R_1$, v_3, v_{II} — соответственно скорость течения пресс-материала в зазоре и перемещения плунжера (пуансона), с уравнением (1) можно определить перепад давления (Δp) [6].

В процессе прессования изделий из реактопластов пресс-материал, как правило, предварительно таблетуют и нагревают в генераторах токов высокой частоты или непосредственно в шнековых пластикаторах получают таблетки с температурой 373—393 К. Технологические показатели, в частности вязкопластичные свойства, различных пресс-материалов в этом температурном интервале хорошо изучены.

Таблица 1. Коэффициенты m и n степенного уравнения течения реактопластов

Марка материала	$m \times 10^{-5}$, Па·с	n	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹	Литературная ссылка
03-010-02	4,0	0,24	0,16—0,64	[7]
Ж2-010-60	2,7	0,05	0,015—0,12	[8]
ДСВ-2Р-2М	2,1	0,11	0,015—0,12	[9]
06-010-02*	5,5	0,10	0,015—0,12	[8]

* Измерения проводили при 373 К.

Представляло интерес исследовать реологические свойства реактопластов в зависимости от интенсивности деформирования. Полученные значения m и n можно использовать для расчета давления прессования изделий из реактопластов по уравнению Фредриксона — Бирда. Объектами исследования служили пресс-материалы марок 03-010-02, Ж2-010-60, ДСВ-2Р-2М и 06-010-02. Установлено, что в области низких скоростей сдвига ($\dot{\gamma}=0,015-0,12$ с⁻¹) течение материала может быть описано степенным уравнением: $\eta = m\dot{\gamma}^{n-1}$ (табл. 1). При скорости сдвига $\dot{\gamma} \geq 10$ с⁻¹ течение материала не подчиняется степенному закону.

Учитывая, что «расслоения» реологических кривых для различных капилляров в области малых скоростей сдвига ($\dot{\gamma} < 10$ с⁻¹) не наблюдается и вклад вязкого течения в общий расход расплава полимера является определяющим (только при $\dot{\gamma}$, равной от 20 до 10⁴ с⁻¹, будет доминировать вклад скорости пристенного скольжения) [3], m и n можно использовать для расчета давления компрессионного прессования.

В качестве примера приведем расчет давления компрессионного прессования цилиндрического изделия (стакана). Давление прессования (p) равно p_1+p_2 , где p_1 — давление, обусловленное горизонтальным фронтом течения пресс-материала (в Па), и рассчитанное по формуле (4), p_2 — давление, обусловленное вертикальным фронтом течения пресс-материала, Па, определенное по формуле (5), где h — половина толщины изделия, м; l — высота (без толщины) изделия, м.

$$Q = \frac{\pi R_0^3}{S+2} \left(\frac{R_0 \Delta p}{2ml} \right)^S (1-K)^{S+2} F(n, k) \quad (1)$$

$$Q = 2\pi \bar{R} \Delta R v_3 \quad (2)$$

$$v_3 = v_{II} (\bar{R}/2\Delta R) \quad (3)$$

$$p_1 = \frac{m(2+S)^n v_{II}^n R_0^{n+1}}{2^n (n+3) h^{2n+1}} \quad (4)$$

$$p_2 = \frac{2ml [v_{II} (S+2) \bar{R}]^n}{R_0^{3n+1} (1-K)^{1+2n}} \quad (5)$$

Следует отметить, что при расчете давления прессования не учитывается дополнительный вклад за счет отверждения пресс-материала в форме (он равен 1—1,5 МПа) и выделения летучих веществ в процессе прессования (2,5—3 МПа). Значение $F(n, k)$ для процесса прессования изделий из реактопластов принято равным 1, так как $K \approx 1$.

Рассчитывали давление компрессионного прессования цилиндрического изделия (стакана) при различных геометрических размерах (табл. 2). Как видно, с увеличением габаритов и уменьшением толщины из-