

УДК 621.762, 51.73, 532.135

КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ РЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ОДНОСТОРОННЕГО ХОЛОДНОГО ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2024 г. А. М. Столин^а, *, П. М. Бажин^а, Л. С. Стельмах^а, П. А. Столин^а

^а Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова РАН, Черноголовка, Россия

* e-mail: amstolin@ism.ac.ru

Поступила в редакцию 20.11.2023 г.

После доработки 19.02.2024 г.

Принята к публикации 20.02.2024 г.

В настоящей работе проведен сопоставительный анализ кинетики уплотнения порошкового материала в процессе одностороннего холодного прессования для разных режимов, в зависимости от задаваемых извне условий на перемещение плунжера пресса: режимы постоянного заданного усилия или скорости. Показано, что в режиме постоянной скорости на плунжере пресса реализуется критическое явление, которое сопровождается прогрессивным нарастанием давления во времени, обеспечивающее резкое увеличение скорости уплотнения. В результате после некоторого периода индукции наступает автоускорение процесса уплотнения во времени. Описанная ситуация имеет физический аналог горения и взрыва. Это обстоятельство позволяет внести в теорию процессов прессования порошковых материалов новые идеи. На основе численных расчетов установлено, что зависимость скорости плунжера пресса от напряжения на нем имеет немонотонный характер, что обусловлено конкурентным влиянием динамического фактора — нагрузки и зависимости объемной вязкости от плотности. Показано, что в режиме заданного усилия имеет место “вредный эффект” — происходит прогрессивное автоторможение процесса уплотнения во времени. Проведенный анализ позволил выработать конкретные рекомендации прогноза рациональных режимов одностороннего прессования порошковых материалов.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, холодное прессование, кинетика уплотнения, критические явления, деформация, реология, плотность

DOI: 10.31857/S0040357124020126, **EDN:** СТАЛЮ

ВВЕДЕНИЕ

В наиболее распространенных традиционных методах переработки полимерных материалов в изделия используются катализаторы и растворители, а также длительные технологические операции нагрева для перевода материала в вязко-текучее или высокоэластическое состояния и его последующее охлаждение [1–2]. При этом возникает ряд принципиальных трудностей, связанных с неоднородным пространственно-временным распределением температуры в материале, а длительность операций лимитирует общую производительность перерабатывающего оборудования.

В этой связи весьма важными являются разработки экологически чистых и ресурсосберегающих технологических процессов твердофазной технологии в отсутствие длительных и энергоемких стадий нагрева и охлаждения расплавленного материала, которые лишены вышеперечисленных недостатков [3–4].

Более полувека изделия из фторопласта (стержни, втулки, диски, пластины и другие изделия) изготавливают традиционными методами порошковой металлургии, которые требуют длительный нагрев материала при температуре около 365–375 °С [5–6]. Такая термическая обработка не приводит к плавлению кристаллитов, вязкость материала остается очень высокой, кристаллическое ядро частиц порошка не изменяется в течение всего технологического процесса (прессование, спекание, охлаждение).

Наиболее простым процессом получения заготовок и изделий из порошковых материалов (ПМ) твердофазной технологией является прямое одностороннее прессование в закрытых пресс-формах. Реализация этого метода не требует сложного оборудования и позволяет относительно легко создавать условия для массового производства заготовок и изделий различного функционального назначения из порошков различных

составов. Прямое прессование широко применяется в различных технических сферах для получения изделий: на предприятиях электротехнической промышленности, машиностроении, химико-фармацевтической промышленности для изготовления лекарственных форм и других отраслях промышленности, подробное перечисление которых здесь вряд ли целесообразно. В связи с этим возникает ряд общих вопросов и ключевых моментов, связанных с изучением технологических особенностей развития процесса уплотнения, в зависимости от технологических параметров и реологических свойств материала. Здесь требуется применение самых разнообразных подходов и инструментальных методов как общеизвестных, так и специфических.

В работах [7–9] проведены комплексные теоретические и экспериментальные исследования твердофазных процессов прямого одностороннего прессования в закрытых пресс-формах для получения высокоплотных заготовок из новых износостойких полимерных композиций на основе политетрафторэтилена (PTFE) для нужд Арктики.

В представленной статье установлена и обоснована прямая физическая аналогия полученных ранее результатов большому числу критических явлений и эффектов, что дает основания для общего подхода к ним. В критических явлениях проявляется резкая (прогрессивно нарастающая) зависимость характеристики процесса от времени. При этом рост этой характеристики приводит к существенному изменению закономерностей процесса вследствие сильной зависимости соответствующих коэффициентов, определяющих скорость процесса [9]. Природа этих явлений различна, и каждому из них присуща своя специфика.

Обнаружено, что в процессе одностороннего холодного прессования порошковых материалов в режиме заданной скорости перемещения плунжера пресса после некоторого периода индукции происходит прогрессивное нарастание давления во времени. Отметим, что в режиме постоянного давления имеет место обратный эффект – происходит замедление процесса уплотнения. В критических явлениях проявляется резкая (прогрессивно нарастающая) зависимость характеристики процесса от времени. При этом рост этой характеристики приводит к существенному изменению закономерностей процесса вследствие сильной зависимости соответствующих коэффициентов, определяющих скорость процесса [9]. Природа этих явлений различна, и каждому из них присуща своя специфика. Это обстоятельство позволяет проводить аналогию с критическими явлениями горения и взрыва.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Теоретический анализ распределения плотности, скорости и напряжений в теории прессования основывается на известной постановке задач [10], полученной из представлений о порошковой заготовке, как о вязком сплошном материале, состоящем из хаотической смеси несжимаемой фазы и пустоты.

Математическая формулировка задачи в цилиндрической системе координат включает в себя уравнения неразрывности, движения и реологические соотношения, которые совместно с начальными и граничными условиями образуют замкнутую систему, позволяющую определить искомые зависимости распределений плотности, скорости и напряжений по объему материала и от времени. Подробно математическая постановка задачи описана в режиме заданного постоянного давления на плунжере пресса в [7], а в режиме заданной постоянной скорости на плунжере пресса – в [9].

Примем, что сдвиговая μ и объемная ξ вязкости зависят от плотности согласно эмпирическим соотношениям [6]:

$$\begin{aligned}\mu(\rho) &= \mu_1 \rho^m \\ \xi(\rho) &= \frac{4}{3} \mu_1 \frac{\rho^{m+1}}{1-\rho}\end{aligned}\quad (1)$$

В начальный момент задано начальное распределение плотности по координате:

$$\rho|_{t=0} = \rho_0(r, z).$$

Задача решалась в лагранжево-массовой системе координат (q, t) , где координата q имеет смысл относительной массы материала в объеме от 0 до z [11]:

$$q = \int_0^z \rho(z, t) dz.$$

Эта система координат используется для уменьшения количества подвижных границ – верхняя граница образца в системе (t, q) останавливается, что упрощает численную реализацию модели.

Задача считалась численно. В результате численного решения находятся неизвестные: относительная плотность (ρ), скорость (V), давление ($P(t)$) и напряжения (σ_{zz} , σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$), которые являются функциями не только координаты времени (t), но и массовой координаты (q).

В расчетах использовались следующие данные для модельного состава ПТФЭ, в следующих пределах: скорость на плунжере пресса $V = 1 \times 10^{-4} - 10^{-3}$ м/с, давление на плунжере

пресса $P = 10^8 - 10^9$ Па, плотность несжимаемой основы материала $\rho_1 = 2.25 \times 10^3$ кг/м³, вязкость несжимаемой основы $\mu_1 = 10^9 - 10^{10}$ Па с, начальная высота заготовки $H_0 = 25 \times 10^{-3} - 70 \times 10^{-3}$ м, диаметр заготовки $D_0 = 1.2 \times 10^{-3} - 5.0 \times 10^{-3}$ м.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе численного решения поставленной задачи проведен сопоставительный анализ кинетики уплотнения порошкового материала для двух разных режимов прессования, в зависимости от задаваемых извне условий на перемещение плунжера: режим заданного усилия либо режим заданной его скорости. Анализ результатов для каждого из этих режимов [7, 9] позволил выявить их принципиальные особенности, обусловленные зависимостью объемной вязкости от плотности согласно формулам (1).

В режиме заданного усилия, согласно условиям равновесия сил, осевое напряжение по высоте материала на стенке пресс-формы из-за пристенного трения резко падает. Как следствие, сопротивление деформированию сжимаемого материала увеличивается во времени, а скорость плунжера падает. В результате происходит прогрессивное автоторможение процесса уплотнения во времени. Характерный вид зависимости скорости плунжера во времени представлен на рис. 1. В режиме постоянной заданной скорости плунжера пресса после некоторого периода индукции происходит прогрессивное автоускорение процесса уплотнения во времени. Характерный вид зависимости давления на плунжере во времени представлен на рис. 2. Эти эффекты представляют интерес для дальнейшего исследования.

Установление зависимости между приложенным давлением и скоростью плунжера — одна из важнейших задач теории и практики холодного прессования порошков, поэтому изучению этого вопроса посвящены многочисленные исследования [1, 12–13].

Для скорости плунжера в зависимости от напряжения было получено следующее уравнение [7]:

$$\frac{\partial V}{\partial q} = -\frac{1}{\left(\frac{4}{3}\mu + \xi\right)\rho} \left(-P(t) + \frac{2}{r_0\rho_0}\tau_{fr}(q_0 - q)\right)$$

Численные расчеты показали, что для фиксированных моментов времени, которые в данном случае следует рассматривать как параметры, эта зависимость имеет немонотонный характер (рис. 1), что обусловлено конкурентным влиянием динамического фактора — нагрузки и зависимостью объемной вязкости от плотности.

На зависимости скорости от напряжения можно выделить две ветви: возрастающую и убывающую. На возрастающем участке изменение плотности, а следовательно, и вязкости не существенно, и основное влияние имеет рост нагрузки, что вызывает рост скорости. На убывающей ветви более существенно влияние увеличение плотности, что вызывает рост объемной вязкости и, как следствие, сопротивление деформированию. Это приводит к понижению скорости. Существование максимального значения скорости, зависящего лишь от времени и начального распределения плотности, является принципиальной особенностью уплотнения сжимаемых материалов, обусловленной зависимостью объемной вязкостью от плотности.

На рис. 3 представлены зависимости давления от времени для больших (кривая 1) и малых (кривая 3) значений скорости плунжера пресса и промежуточных (кривая 2) соответственно. Видно, что давление возрастает взрывным образом для всех значений скоростей, только для меньших значений индукционный период больше. Эти результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными на рис. 2. В этом состоит глубокая аналогия между процессом неизотермического течения вязкой жидкости. Описанная ситуация вполне аналогична той, которая имела место при гидродинамическом тепловом взрыве, когда сильная нелинейная зависимость вязкости от температуры обуславливала немонотонный характер зависимости сопротивления деформированию от скорости деформирования [14]. Интересно отметить, что на основе использо-

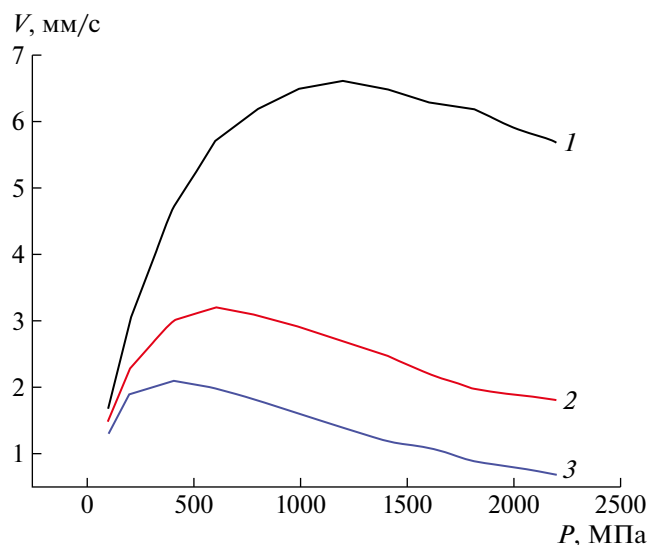


Рис. 1. Зависимость скорости плунжера пресса (V) от давления (P) для различных значений времени (t): 1—1.5 с; 2—3 с; 3—4.5 с. Параметры: $H_0 = 5 \times 10^{-2}$ м, $d_0 = 2.5 \times 10^{-3}$ м.

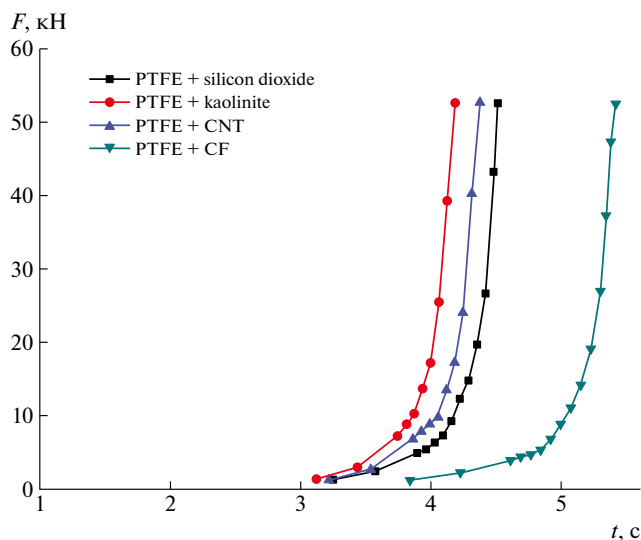


Рис. 2. Экспериментальная зависимость давления (P) от времени (t) при холодном прессовании полимерных композиций для различных значений скорости плунжера пресса (V): $V = 1 \times 10^{-4}$ – 6×10^{-4} м/с [8].

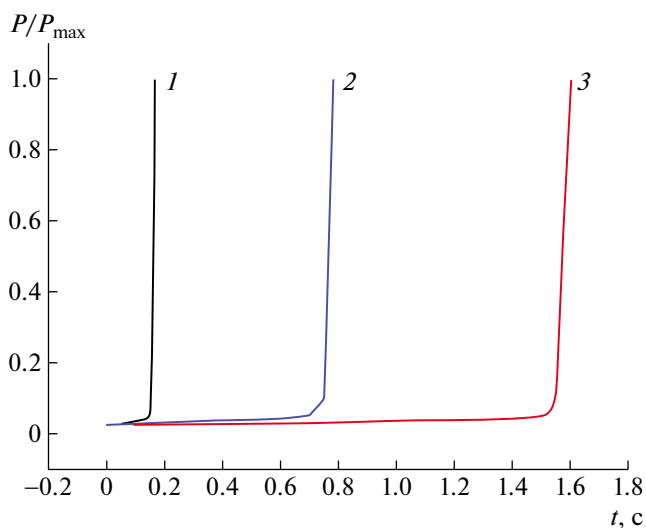


Рис. 3. Зависимость относительного давления ($P/P_{\max}$) от времени (t) для двух значений скорости плунжера пресса (V): 1 – $V = 1 \times 10^{-3}$ м/с; 2 – $V = 5 \times 10^{-4}$ м/с, 3 – $V = 1 \times 10^{-4}$ м/с. Параметры: $H_0 = 5 \times 10^{-2}$ м, $d_0 = 2.5 \times 10^{-3}$ м.

вания этого явления был создан принципиально новый тип неизотермического ротационного вискозиметра, который позволяет определить зависимость вязкости от температуры из одного опыта.

На рис. 4 представлена зависимость разнотности (разность значений относительной плотности на плунжере пресса и на нижней границе образца). Видно, что разнотность в образце в режиме постоянной скорости на плунжере пресса падает до нуля (однородный образец) за доли секунды.

Отметим, что при постоянном усилии на

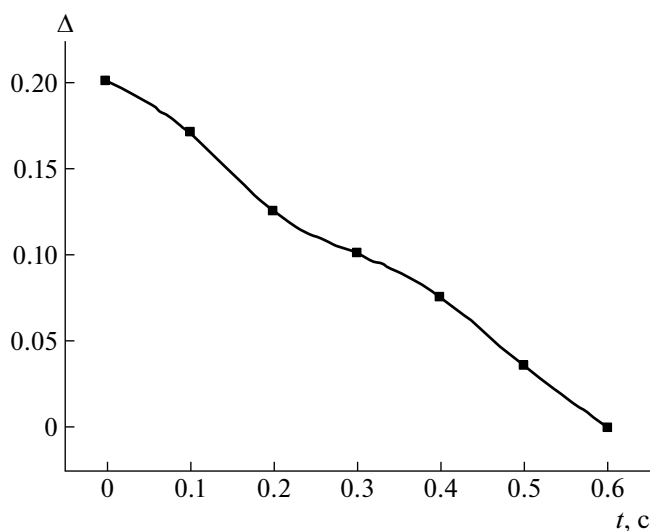


Рис. 4. Зависимость разнотности (Δ) от времени (t) при постоянной скорости на плунжере пресса (V): $V = 1 \times 10^{-4}$ м/с. Параметры: $\tau_{fr} = 0.05P$, $H_0 = 5 \times 10^{-2}$ м, $d_0 = 2.5 \times 10^{-3}$ м.

плунжере пресса на рис. 5 разнотность сначала растет, а затем падает до определенного значения. Это показывает, что режим с постоянной скоростью более предпочтителен для получения беспористого образца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное в настоящей работе математическое моделирование кинетики уплотнения в процессе одностороннего прессования порошкового материала выявило принципиальную особенность режима заданной скорости плунже-

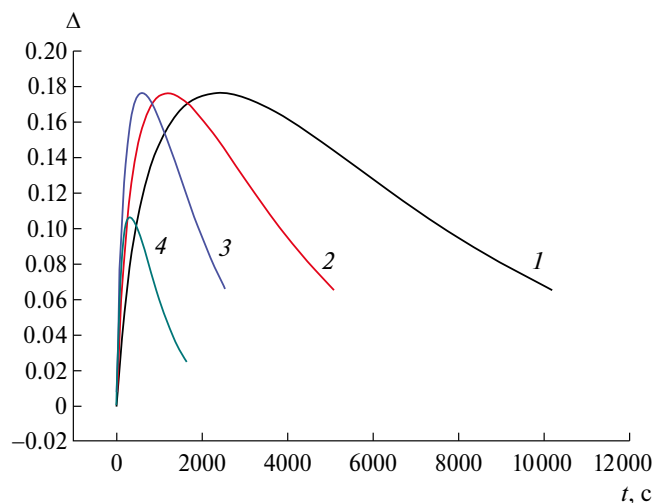


Рис. 5. Зависимость разнотности (Δ) от времени (t) для различных значений давления (P): 1 – $P = 50$ МПа; 2 – $P = 100$ МПа; 3 – $P = 200$ МПа; 4 – $P = 250$ МПа. Параметры: $\tau_{fr} = 0.05P$, $H_0 = 5 \times 10^{-2}$ м, $d_0 = 2.5 \times 10^{-3}$ м [7].

ра пресса от режима заданной нагрузки: в этом случае после некоторого периода индукции происходит прогрессивное нарастание сопротивления деформированию. Этот эффект обусловлен сильно нелинейной зависимостью объемной вязкости от плотности. Увеличение плотности во времени в режиме заданной скорости плунжера вызывает увеличение напряжения, что позволяет сделать вывод о технологическом преимуществе этого режима, по сравнению с режимом заданного усилия на плунжере. Описанная ситуация вполне аналогична той, которая имеет место при гидродинамическом тепловом взрыве, когда сильная нелинейная зависимость вязкости от температуры обуславливает “взрывное” нарастание температуры во времени. Природа известных критических явлений различна, и каждому из них присуща своя специфика. Однако для всех этих явлений существуют общие характерные особенности и следствия, важные для технологической или исследовательской практики. Намного проще работать с объектом научного исследования, если находишь аналог последнего с явными и понятными характеристиками. Прямая аналогия дает основания для общего подхода к ним.

Выявлено, что немонотонный характер зависимости скорости плунжера пресса от напряжения обусловлен конкурентным влиянием динамического фактора — нагрузки и объемной вязкости, зависящей от плотности. Показано, что на возрастающем участке этой зависимости изменение плотности, а следовательно, и вязкости не существенно, и основное влияние имеет рост нагрузки, что вызывает рост скорости плунжера. На убывающей ветви более существенно влияние увеличения плотности, что вызывает рост объемной вязкости и, как следствие, приводит к понижению скорости. Существование максимального значения скорости, зависящего лишь от времени и начального распределения плотности, является принципиальной особенностью уплотнения сжимаемых материалов, обусловленной зависимостью объемной вязкости от плотности. Показано, что прессование в режиме заданной скорости позволяет получить компактный материал заготовки, однородное распределение плотности и осуществляется за меньшее время.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

D	диаметр, м
H	высота заготовки, м
P	давление, МПа
σ	напряжение, МПа
μ	сдвиговая вязкость, Па·с
μ_1	вязкость несжимаемой основы, Па·с

r	радиус, м
ρ	относительная плотность
ρ_1	плотность несжимаемой основы материала, кг/м ³
t	время, с
τ_{fr}	напряжение трения, МПа
V	скорость, м/с
z	высота, м
ξ	объемная вязкости материала, Па·с

ИНДЕКСЫ

0	начальное значение
1	максимальное значение
*	характерное время
fr	трение (friction)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Петросян Г.Л.* Пластическое деформирование порошковых материалов. М.: Металлургия, 1988. С. 152.
2. *Анциферов В.Н., Перельман В.Е.* Механика процессов прессования порошковых и композиционных материалов. М.: Наука, 2001.
3. *Ениколопов Н.С.* Избранные труды. Воспоминания: К семидесятилетию акад. Н.С. Ениколопова. Черноголовка: ИСМАН. 1999. С. 102.
4. *Абрамов В.В.* Состояние и перспективы развития промышленности переработки пластмасс в России. Л.: Химия, 1972. С. 376.
5. *Пугачев А.К., Росляков О.А.* Переработка фторопластов в изделия. Л.: Химия, 1987. С. 10.
6. *Баронин Г.С., Столин А.М., Кербер М.Л., Дмитриев В.М.* Переработка полимеров и композитов в твердой фазе: учебное пособие. Тамбов: Тамб. гос. ун-т, 2009. С. 140.
7. *Столин А.М., Стельмах Л.С., Стельмах Э.В.* Использование холодного прессования в переработке композиционного материала на основе фторопласта // Теорет. основы хим. технологии. 2023. Т. 57. № 1. С. 117.
8. *Аверичев О.А., Столин А.М., Михеев М.В., Лазарева Н.Н., Охлопова А.А.* Твердофазное одноосное прессование новых износостойких полимерных композиций на основе политетрафторэтилена // Композиты и наноструктуры. 2022. Т. 14. № 2 (54). С. 131.
9. *Столин А.М., Стельмах Л.С.* Особенности кинетики уплотнения композиционного материала на основе политетрафторэтилена в режиме постоянной скорости плунжера пресса // Теорет. основы хим. технологии. 2023. Т. 57. № 3. С. 340.
10. *Скотников М.В., Чулков В.Н., Прилепкин В.Н., Джангириян В.Г.* Распределение напряжений и скоростей при уплотнении вязких тел в замкнутых объемах // Порошковая металлургия. 1984. № 6. С. 21.
11. *Stolin A.M., Stel'makh L.S.* Mathematical modeling of

- SHS-compaction / Extrusion: an autoreview // J. SHS. 2008. V. 13. № 1. P. 53.
12. *Анциферов В.Н., Перельман В.Е.* Механика процессов прессования порошковых и композиционных материалов. М.: Наука, 2001.
13. *Андреевский В.А.* Введение в порошковую металлургию. Илим, 1988. С. 174.
14. *Столин А.М., Малкин А.Я., Мержанов А.Г.* Неизотермические процессы и методы исследования в химии и механике полимеров // Успехи химии. 1979. Т. XLVIII. № 81. С. 1492.