

DOI: [10.7242/1999-6691/2020.13.2.11](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.2.11)

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВАМИ ANSYS ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

О.Ю. Сметанников, Ю.Б. Фасхутдинова, Е.В. Субботин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

Цель настоящей работы заключалась в выяснении причин осевой усадки термоусаживаемых трубок из сшитого полиэтилена на этапе экспандинга в технологическом процессе их изготовления, поиске способов устранения данной проблемы, а также в численном моделировании термомеханического поведения изделий из полимерных материалов с памятью формы. Для этого сначала в пакете ANSYS была выбрана адекватная физическая модель для описания термомеханического поведения полимерных материалов с памятью формы, разработана и реализована программа экспериментов по идентификации материальных констант сшитого полиэтилена, осуществлены верификационные испытания. Затем проведено упрощенное численное моделирование термомеханического поведения термоусаживаемой трубки средствами программного пакета ANSYS, не учитывающее движение заготовки по полости экспандера. Для устранения продольной усадки предложено сохранять продольный размер заготовки путем приложения осевой силы определенной величины. Найдены значения осевой силы, которым отвечают продольная усадка, не превышающая 1%, и 15%-ная продольная усадка. Сделан вывод, что причиной появления продольной усадки является действие слишком большой осевой силы. В последнем разделе статьи представлено численное моделирование реального технологического этапа экспандинга термоусаживаемой трубки. Вычислены величины осевой силы, действующей в заготовке, при равенстве скоростей подачи и извлечения заготовки из экспандера для обеспечения постоянства ее длины в первом случае и при 15%-ном начальном удлинении во втором случае. Расчетные данные подтверждают первоначальное предположение о причинах появления продольной усадки.

Ключевые слова: память формы, сшитый полиэтилен, термоусаживаемая трубка, термомеханическое поведение

ANSYS RESEARCH OF SHAPE MEMORY EFFECTS IN CROSS-LINKED POLYETHYLENE PRODUCTS

O.Yu. Smetannikov, Yu.B. Faskhutdinova, and E.V. Subbotin

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

This work focuses on determining the causes of axial shrinkage of heat-shrinkable pipes made of cross-linked polyethylene at the expansion stage of their production process and the ways to eliminate this problem. For this purpose, thermomechanical behavior of products made of polymer materials with shape memory was numerically simulated. First, an appropriate physical model was selected in the ANSYS package to describe the thermomechanical behavior of polymer materials with shape memory, an experimental program was developed and implemented to identify the material constants of cross-linked polyethylene, and several verification tests were performed. Then, a simplified numerical simulation of the thermomechanical behavior of the heat-shrinkable tube was performed using the ANSYS software package, which does not take into account the movement of the work piece through the expander cavity. To eliminate longitudinal shrinkage, it is proposed to preserve the longitudinal size of the work piece by applying an axial force of a certain value. The axial force values corresponding to a longitudinal shrinkage not exceeding 1% and a 15% longitudinal shrinkage were found. It was established that the longitudinal shrinkage is caused by the extremely high axial force. The last section of the article presents a numerical simulation of the real technological stage of expansion of a heat-shrinkable tube. The values of the axial force acting in the work piece are calculated when the feed and extraction speeds of the work piece from the expander are equal to ensure the constancy of its length in the first case and when the initial elongation reaches 15% in the second case. The calculated data confirm the initial assumption about the causes of longitudinal shrinkage.

Keywords: shape memory, cross-linked polyethylene, shrinkable tube, thermomechanical behavior

1. Введение

В настоящее время интерес к использованию высокотехнологичных полимеров возрастает, и, как следствие, растет потребность в теоретической разработке моделей, которые могут описать их термомеханическое поведение в различных условиях. Новые, так называемые интеллектуальные материалы обладают особыми свойствами, открывающими возможности для создания уникальных изделий для применения в широком спектре отраслей, таких как медицина, строительство, машиностроение и другие. Одно из этих свойств — эффект памяти формы — способность некоторых материалов, испытавших деформирование, восстанавливать начальную форму и размер в результате приложения к ним какого-либо последующего воздействия, чаще всего температуры [1, 2]. Данное свойство позволяет создавать условия для «программирования» желаемых конечных деформаций изделий, а также управлять самим процессом деформирования. Востребованность как теоретических основ, так и практических методов изучения интеллектуальных материалов, способов создания и управления характеристиками желаемых деформаций в изделиях из материалов с памятью формы с помощью оптимального подбора параметров температурных и механических воздействий обуславливает актуальность исследования.

Полимеры представляют собой аморфные среды, свойства которых имеют зависимость от температуры. Структурно полимеры выглядят как длинные гибкие макромолекулы, способные менять пространственное расположение атомов под действием механического и теплового воздействия, при этом подвижность и скорость конформаций зависят от температурного режима [3]. При низких температурах подвижность молекул мала, поэтому полимерное тело сохраняет деформированное состояние после прекращения механического воздействия. Свойство памяти формы состоит в том, что при достаточном числе дополнительных поперечных связей между молекулами (сшивок), создаваемых при помощи излучающего или химического воздействия, в процессе последующего нагрева подвижность сегментов молекул повышается, и тело стремится восстановить недеформированную форму [1, 4, 5].

Для численного моделирования термомеханического поведения полимеров могут применяться интегральные уравнения состояния, включающие непрерывные функции, описывающие реологические свойства материала, или дифференциальные реологические уравнения состояния, использующие дискретный набор времен релаксации [6]. Для каждой модели необходимо проведение экспериментальной работы по определению характеристик материала. При выборе модели следует исходить из ее возможности учитывать свойства памяти формы. Одни авторы предлагают делать это за счет отыскания подходящих механических характеристик. Так, в работе [7] для объяснения эффекта памяти формы вводятся функции скорости фиксации формы и скорости восстановления формы; значения функций зависят от деформации в текущем после разгрузки цикле и от деформации при свободном расширении в двух последующих циклах, а также могут быть связаны с номером цикла памяти формы. Авторы [8] предложили для учета эффекта памяти формы модифицировать термомеханическую модель Тобуши, которая представляет собой систему, состоящую из двух параллельно соединенных упругих элементов — демпфера и термической составляющей необратимой деформации. Последняя имеет вид кусочно-заданной функции, выраженной через функцию деформации ползучести, пороговое значение деформации и температурный параметр. Путем преобразований авторы [8] смогли добиться разделения термической и механической составляющих и представлять любую систему в виде связанных цепочек механических и термических элементов.

Существует широко распространенный подход описывать полимер с памятью формы как среду, которая при температуре ниже определенного значения пребывает в стеклообразном состоянии, а при нагреве переходит в высокоэластическое состояние. Вариативность заключается в разнообразии способов определения характеристик переходного процесса, но физический смысл вводимых характеристик, как правило, общий и может трактоваться как объемная доля материала, находящегося в одном из возможных состояний [3, 5, 9–11]. Например, в работе [9] деформация складывается из упругой составляющей, деформации наследственной упругости и деформации памяти формы. Скорость последней зависит от напряжений, самой деформации и введенного параметра процесса конформаций q , который представляется как дифференциальное уравнение, аналогичное уравнению для обычных сплавов с памятью формы. Значение параметра q изменяется внутри переходного температурного интервала и постоянно за его пределами. В работе [10] состояния полимера указаны как активная упругая и стекловидная неупругая фазы. Ключевой характеристикой переходного процесса является температура стеклования T_g , которую можно найти экспериментально. Вводится переменная $\psi(\mathbf{x}, t)$ — функция геометрического места точек, относящихся к активной и стекловидной фазам, между которыми существует переходная зона толщиной s , внутри которой возможно наличие двух фаз одновременно [10]. В работах [3, 5, 11] при построении определяющих соотношений исходят из упругого потенциала Пенга–Ланделла. Полученные соотношения в конечной форме удобны для использования, в отличие от дифференциальных, и имеют небольшой набор параметров. Согласно [3, 5] вводится функция стеклования, характеризующая степень завершенности процесса наращивания жесткости материала при стекловании. Она задается в виде распределения и определяется шириной температурного интервала стеклования и его положением на температурной оси. Такая форма представления хорошо описывает реологические свойства полимеров, в том числе с памятью формы.

В работах [12] и [13] предложены различные формы упругого потенциала, каждая из которых имеет границы применимости. Среди рассмотренных двухконстантных моделей сжимаемых и слабосжимаемых упругих изотропных материалов потенциал Пенга–Ланделла и потенциал нео-Гука являются лучшими обобщениями на случай вязкоупругого поведения. Для частного случая несжимаемых материалов предложен потенциал Трелоара.

На практике свойство памяти формы используется, в частности, в термоусаживаемых трубках, применяемых для изоляции различного рода соединений в «полевых» условиях. В процессе производства воссоздается первый этап цикла памяти формы, при котором тело переходит в «замороженное» деформированное состояние. Ко второму этапу цикла памяти формы можно отнести нагрев и восстановление оригинальной формы, то есть функционирование готовых термоусаживаемых трубок на практике в качестве изоляционных материалов.

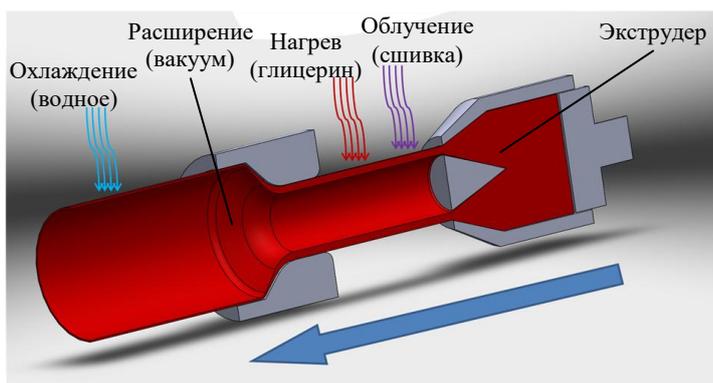


Рис. 1. Последовательность изготовления термоусаживаемой трубки

трубки определенного диаметра. Готовая трубка попадает в ванну с водой, где охлаждается, и происходит фиксация ее формы. В процессе экструзии очень важно контролировать качество продукта на выходе, следить за равномерностью толщины стенки и соблюдением нужного диаметра трубки. Решение этих задач требует отдельного рассмотрения и исследования в дальнейшем. На данном этапе в расчетных схемах предполагаются постоянство диаметра при экструзии трубки и равномерность толщины стенок.

На этапе сшивки производится радиационная обработка полученной заготовки для того, чтобы трубка стала термоусаживаемой, иными словами, приобрела новое свойство, называемое «памятью формы». В основе процесса лежит принцип перестроения внутренних связей между молекулами вещества без изменения его химического состава. После процесса экструзии трубка помещается в облучающую камеру, которая должна обеспечить возникновение поперечных (межмолекулярных) связей по возможности одновременно во всех точках облучаемого материала. Для исключения брака необходим подбор радиационной дозы и оптимизация расположения источников излучения [4].

Экспандинг (расширение или раздувка) — этап, завершающий процесс превращения сшитых полимерных заготовок в полноценную термоусаживаемую трубку. Для поперечного растягивания трубки существуют специальные устройства — экспандеры, в которых реализуются разные способы воздействия на объект. В данной работе рассматривается расширение трубок за счет помещения в вакуум. Трубка предварительно нагревается в растворе глицерина, подается в специальную камеру, раздувается до ее размеров, а затем охлаждается водой. При экспандинге появляется нежелательное явление — продольная усадка трубки. Далее в работе сделано предположение о причинах возникновения этого явления, и предложены способы его уменьшения.

Благодаря сшивке полимерный материал трубки приобретает более упорядоченную трехмерную структуру. В нем образуются новые межмолекулярные связи в направлении, заданном облучением. В растянутой трубке, предварительно разогретой до температуры выше температуры релаксационного перехода, но ниже температуры плавления, увеличивается расстояние между молекулами, но межмолекулярные связи не рвутся. После остывания материал трубки становится стеклообразным и держит новую форму, но при нагреве стремится вернуться в первоначальное (нераздутое) состояние. Это свойство используется при применении термоусаживаемых трубок по назначению (в качестве изоляции соединений труб, электрических соединений и другого).

Целью настоящей работы являлись поиск причин осевой усадки при эксплуатации готовых изделий, на практике составляющей порядка 15%, и предложение способов устранения данной проблемы. Для этого сначала в ANSYS выбралась адекватная физическая модель, способная описать термомеханическое поведение полимерных материалов с памятью формы, на ее основе разработана и реализована программа экспериментов по идентификации материальных констант сшитого полиэтилена, проведены верификационные испытания. Затем для термоусаживаемой трубки строилась упрощенная численная модель, не учитывающая движение заготовки по полости экспандера, исследовались закономерности ее термомеханического поведения, предварительно определялись технологические параметры, обеспечивающие продольную усадку изделия не выше 1%, а также находились соответствующие параметры для модели с осевой усадкой 15%. Для подтверждения предварительных выводов проведено численное моделирование реального процесса изготовления термоусаживаемых трубок.

2. Описание эксперимента

2.1. Выбор определяющих соотношений

В качестве определяющих выбраны соотношения вязкоупругой модели Прони [14] для случая отсутствия объемной релаксации:

Исследование средствами ANSYS эффекта памяти формы в изделиях из сшитого полиэтилена предполагает численное моделирование процесса изготовления термоусаживаемых трубок, который можно условно разделить на три этапа: экструзию, сшивку и экспандинг. Последовательность создания заготовок представлена на рисунке 1.

На этапе экструзии полимерная смесь загружается в бункер экструдера и нагревается до температуры плавления. Затем расплав под давлением направляется на фильеру, с помощью которой формируется заготовка в виде

$$\boldsymbol{\sigma} = \int_0^t 2G(t-\tau)\dot{\mathbf{e}}(\tau)d\tau + \mathbf{IK}\theta, \quad (1)$$

где t — время эксперимента, $\boldsymbol{\sigma}$ — тензор напряжений Коши, \mathbf{e} — девиатор тензора деформаций (точка над символом обозначает дифференцирование по времени), θ — объемная деформация, \mathbf{I} — единичный тензор, K — модуль объемного сжатия, $G(t)$ — модуль сдвиговой релаксации, выраженный рядом Прони:

$$G(t) = G_0 \left[\alpha_0^G + \sum_{i=1}^{n_G} \alpha_i^G \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^G}\right) \right]. \quad (2)$$

Здесь α_i^G — относительные модули сдвига для времен сдвиговой релаксации τ_i^G , n_G — количество времен сдвиговой релаксации. Из условий $G_0 = G|_{t=0}$, $G_\infty = G|_{t=\infty}$ следует:

$$\alpha_0^G = \frac{G_\infty}{G_0}, \quad \sum_{i=1}^{n_G} \alpha_i^G = \frac{G_0 - G_\infty}{G_0}. \quad (3)$$

2.2. Экспериментальное определение параметров модели

В представленной выше модели предполагается, что материал испытывает только сдвиговую релаксацию и характеризуется постоянным модулем объемного сжатия. Традиционно для получения экспериментальных параметров используются данные испытаний не на сдвиг, а на одноосное растяжение–сжатие. Модуль релаксации для одноосного растяжения–сжатия имеет вид, аналогичный (2):

$$E(t) = E_0 \left[c_0 + \sum_{i=1}^{N_e} c_i \exp\left(-\frac{t}{\beta_i}\right) \right].$$

Здесь: c_i — относительные модули растяжения–сжатия для времен релаксации β_i ; N_e — количество времен релаксации растяжения–сжатия. По аналогии с (3), из $E_0 = E|_{t=0}$, $E_\infty = E|_{t=\infty}$ следует:

$$c_0 = \frac{E_\infty}{E_0}, \quad \sum_{i=1}^{N_e} c_i = \frac{E_0 - E_\infty}{E_0}. \quad (4)$$

Положим, что времена релаксации для сдвига (τ_i^G) и растяжения–сжатия (β_i) совпадают, и их количество одинаково: $N_e = n_G = n$. Тогда из (3) и (4) можно найти соотношение вида:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i^G = \sum_{i=1}^n c_i \left[\frac{G_0 - G_\infty}{G_0} \cdot \frac{E_0}{E_0 - E_\infty} \right].$$

Обозначим: $B = \frac{G_0 - G_\infty}{G_0} \cdot \frac{E_0}{E_0 - E_\infty}$, тогда получаем:

$$\alpha_i^G = c_i \cdot B. \quad (5)$$

Известно, что

$$G_0 = E_0 / (2(1 + \nu_0)), \quad (6)$$

$$G_\infty = E_\infty / (2(1 + \nu_\infty)), \quad (7)$$

где ν_0 , ν_∞ — значения коэффициента Пуассона в момент времени $t=0$ и $t=\infty$ соответственно. Из условия постоянства модуля объемного сжатия K^* находим ν_∞ :

$$K^* = E_0 / (3(1 - 2\nu_0)) = \text{const}, \quad (8)$$

$$K_\infty = K^* = E_\infty / (3(1 - 2\nu_\infty)) \Rightarrow \nu_\infty = 0,5(1 - E_\infty / (3K^*)). \quad (9)$$

Подставив (9) в (7), получаем:

$$G_\infty = \frac{E_\infty}{2(1 + 0,5(1 - E_\infty / (3K^*)))} = E_\infty \frac{3}{9 - (E_\infty) / K^*}. \quad (10)$$

Таким образом, из (5), (8), (6) и (10) можно вычислить α_i^G , K^* , G_0 , G_∞ , если предварительно отыскать c_i , E_0 , E_∞ , ν_0 . Неизвестные, за исключением коэффициента Пуассона, можно определить из эксперимента на растяжение–сжатие. Для этого воспользуемся определяющими соотношениями для одноосного случая в виде:

$$\sigma(t) = \int_0^t \left[E_\infty + E_0 \sum_{i=1}^{N_s} c_i \exp\left(-\frac{t-\tau}{\beta'_i}\right) \right] d\varepsilon(\tau), \quad (11)$$

где $\beta'_i = \beta_i / A(T)$ — приведенные времена релаксации в соответствии с принципом температурно-временной аналогии, $A(T)$ — функция сдвига. Материал будем считать терморологически простым, поэтому функция сдвига Вильямса–Ланделла–Ферри запишется так:

$$\lg(A(T)) = \frac{C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)}, \quad (12)$$

где T — текущая температура в произвольный момент времени, T_r — постоянная базовая температура (параметр выбирается из соображений удобства аппроксимации), C_1 , C_2 — эмпирические постоянные материала. При представлении деформации в виде гармонической функции:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_a \sin(\omega t), \quad (\omega = \text{const}, T = \text{var}), \quad t \rightarrow \infty,$$

выражение (11) преобразуется к виду:

$$\sigma(t) = \varepsilon_a \left\{ \sin(\omega t) \left[E_\infty + \omega^2 E_0 \sum_{i=1}^{n_G} \frac{\beta_i'^2 c_i}{1 + \beta_i'^2 \omega^2} \right] + \cos(\omega t) \omega E_0 \sum_{i=1}^{n_G} \frac{\beta_i' c_i}{1 + \beta_i'^2 \omega^2} \right\}.$$

Отсюда действительная и мнимая части комплексного модуля упругости будут иметь вид:

$$E' = E_\infty + \omega^2 E_0 \sum_{i=1}^{n_G} \frac{\beta_i'^2 c_i}{1 + \beta_i'^2 \omega^2}, \quad E'' = \omega E_0 \sum_{i=1}^{n_G} \frac{\beta_i' c_i}{1 + \beta_i'^2 \omega^2}.$$

Для определения числовых значений температурной зависимости комплексного модуля были проведены натурный и численный эксперименты и произведена верификация модели. Термомеханический эксперимент для стеклующегося материала осуществлен с помощью динамического механического анализатора DMA Q800 TA.

На рисунке 2 представлены температурные зависимости действительной — E' , и мнимой — E'' , частей комплексного модуля, определенных из эксперимента и в результате численного решения. Существенное различие численной и экспериментальной кривых для мнимой части модуля можно объяснить недостаточной корректностью используемой в расчете температурно-временной аналогии при переходе через интервал стеклования. Следует учесть, что величины физических характеристик, найденные экспериментально, могут иметь неточности вследствие разных причин, например, из-за взаимодействия образца с захватами испытательной машины [15]. Причины и устранение неточностей требуют дальнейшего дополнительного исследования.

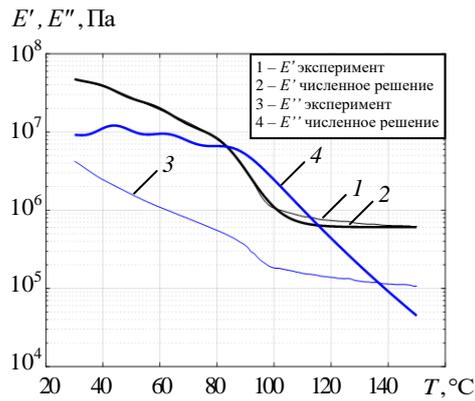


Рис. 2. Температурные зависимости действительной (E') и мнимой (E'') частей комплексного модуля упругости

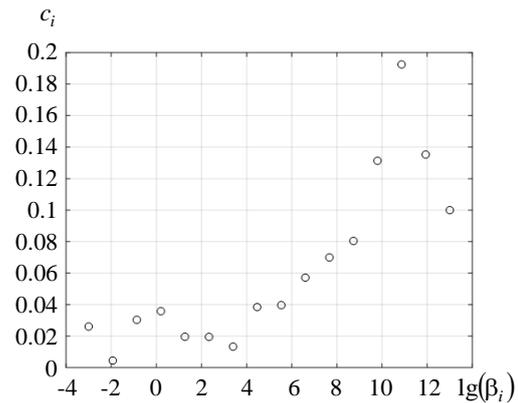


Рис. 3. Зависимость c_i от β_i

Признав установленные характеристики удовлетворительными, получаем зависимость весовых коэффициентов c_i от времени релаксации β_i (Рис. 3). Значения β_i заданы равномерно распределенными на логарифмической шкале времени в интервале от 10^{-3} до 10^{13} с, а константы c_i найдены в пакете Matlab согласно процедуре нелинейной минимизации относительной невязки расчетных и экспериментальных данных (процедура `fminsearch`).

В расчете принимались во внимание:

- мгновенные свойства вязкоупругого материала: модуль упругости $E = 100$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu_0 = 0,42$ (это значение для полиэтилена при нормальных условиях выбралось в соответствии с экспериментальными данными работы [16]), коэффициент температурного расширения $\alpha_T = 1 \cdot 10^{-4} \text{ C}^{-1}$;
- модуль объемного сжатия (считался постоянным, рассчитывался по известной формуле: $K = E_0 / (3(1 - 2\nu_0))$);
- константы Вильямса–Ланделла–Ферри для функции температурно-временного сдвига: $T_r = 218$ К, $C_1 = 25$, $C_2 = 160$ К;
- числовые значения вязкоупругих констант функции релаксации (приведены в таблице 1);
- количество времен релаксации: $n_G = 16$.

Таблица 1. Числовые значения вязкоупругих констант функции релаксации

i	$\alpha_i^G \cdot 10^2$	β_i
1	2,61	$1,0 \cdot 10^{-3}$
2	0,45	$1,2 \cdot 10^{-2}$
3	3,04	$1,4 \cdot 10^{-1}$
4	3,58	1,6
5	1,96	$1,8 \cdot 10$
6	1,95	$2,2 \cdot 10^2$
7	1,34	$2,5 \cdot 10^3$
8	3,84	$2,9 \cdot 10^4$
9	3,96	$3,4 \cdot 10^5$
10	5,72	$4,0 \cdot 10^6$
11	7,00	$4,6 \cdot 10^7$
12	8,04	$5,4 \cdot 10^8$
13	13,14	$6,3 \cdot 10^9$
14	19,25	$7,4 \cdot 10^{10}$
15	13,53	$8,6 \cdot 10^{11}$
16	10,00	$1,0 \cdot 10^{13}$

2.3. Верификация

На основании полученных зависимостей были проведены термомеханические испытания образцов для верификации модели и параметров определяющих соотношений.

В экспериментах на одноосное растяжение применялись образцы, вырубленные из осаженной трубки с внешним диаметром 10 мм и толщиной стенки 0,96 мм. Образцы были прямоугольными в плане и имели размер $6,25 \times 35$ мм. Начальная дистанция между захватами составляла 20 мм. Материалом являлся сшитый полиэтилен.

Испытания проводились по следующему сценарию: через заданные промежутки времени образец нагревался до 35°C , потом растягивался на величину $\varepsilon = 5\%$ и нагревался уже до 60°C , затем растягивался до $\varepsilon = 10\%$, и при следующем нагреве температура достигала 100°C . На рисунке 4 представлены графики изменения во времени деформации, температуры и напряжения (тесты № 1 и 2). Для подтверждения правильности выбора определяющих соотношений для напряжений (Рис. 4д, е) приведены результаты численного решения. Характерные интервалы на графиках напряжений демонстрируют их релаксацию при постоянстве деформации и температуры, а также релаксационные переходы в материале при постоянстве деформации, но резком повышении температуры.

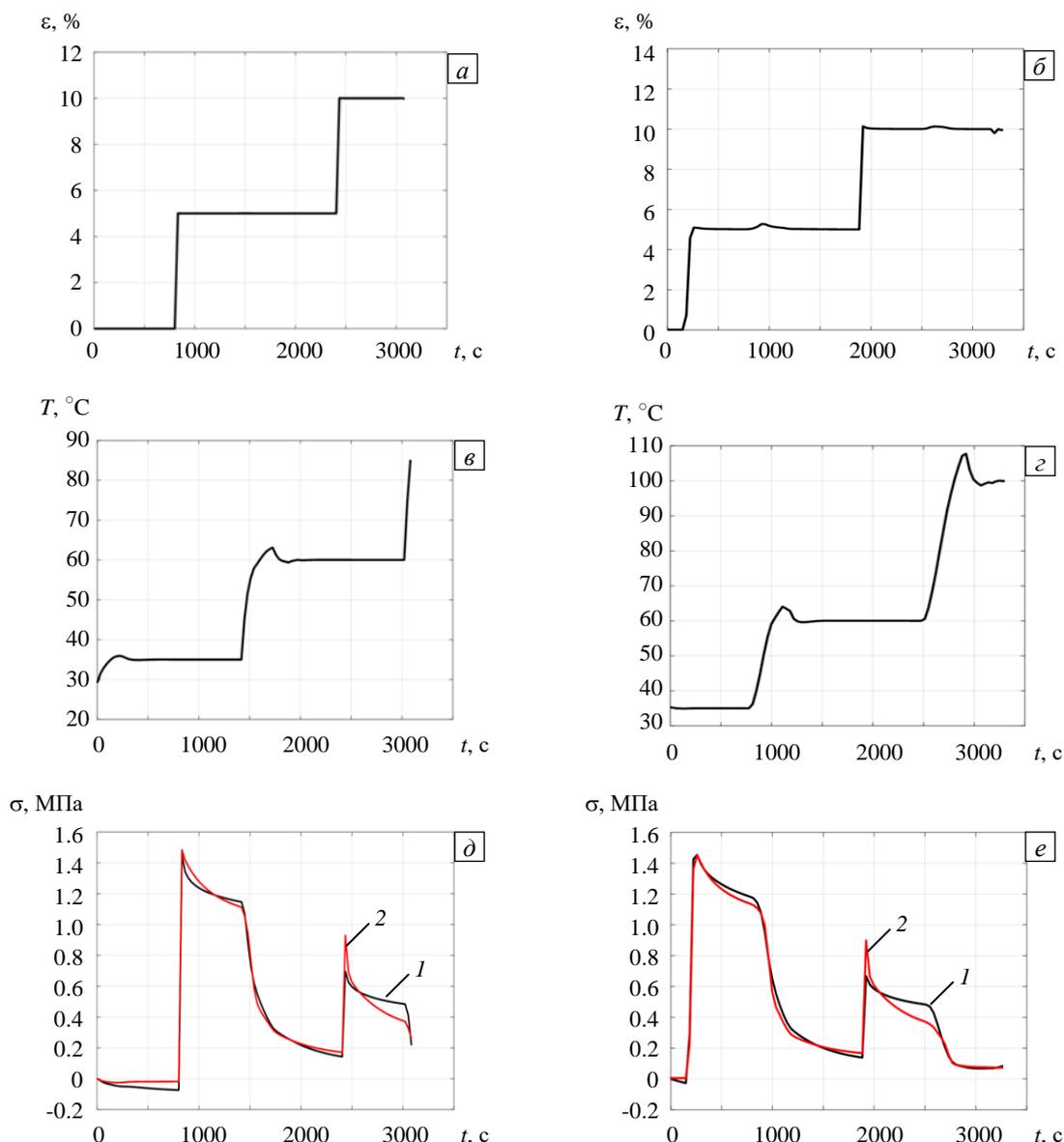


Рис. 4. Тест 1-й (а, в, д), тест 2-й (б, г, е); деформация (а, б), температура (в, г); напряжение (д, е); кривые 1 – эксперимент, 2 – численное решение

Исходя из сопоставления численных и экспериментальных результатов рисунка 4, можно сделать вывод об адекватности выбора модели для описания термомеханического поведения полимерного материала с памятью формы.

3. Демонстрация на модельной задаче эффектов памяти формы в термоусаживаемой трубке

Программными средствами пакета ANSYS было проведено численное моделирование технологического этапа экспандинга трубки с последующей термоусадкой готового изделия.

На практике этапы производства термоусаживаемых трубок обычно следуют друг за другом непрерывно. С целью упрощения расчета для заготовки из сшитого полиэтилена в качестве расчетной схемы рассматривался фрагмент конечной длины (Рис. 5), который проходит те же технологические операции, что и реальный фрагмент в составе всей заготовки (Рис. 1). Но выше отсутствовала детализация этапа экспандинга, связанная с неравномерным распределением процессов по длине трубки. Считалось, что все операции действуют на всей длине заготовки, последовательно сменяя друг друга по времени. Для трубки были приняты размеры: длина 20 мм, диаметр 10 мм, толщина 0,3 мм.

Определяющие соотношения отвечали вязкоупругой модели Прони (1) с использованием в расчете функции сдвига Вильямса–Ланделла–Ферри (12). Осесимметричность геометрии исследуемого объекта, граничных условий и приложенных нагрузок позволили свести задачу к плоской постановке, поэтому для расчета был взят плоский 8-узловой осесимметричный конечный элемент Plane183. Решена

статическая задача с учетом больших деформаций и полным итерационным поиском решения по методу Ньютона–Рафсона.

Численное моделирование этапа экспандинга включало расчетные шаги:

- нагрев до температуры 160°C;
- расширение заготовки путем приложения радиальных перемещений к точкам на внутренней поверхности трубки (Рис. 5), заданных в виде функции времени $U_r(t)$ (Рис. 6);
- охлаждение до 20°C;
- снятие нагрузки (освобождение от закреплений);

Операция термоусадки состояла из шагов:

- нагрева свободной заготовки;
- выдержки при постоянной температуре;
- охлаждения.

При этом проведено 3 вычислительных эксперимента, различающихся типом ограничений в осевом направлении. В расчетах использовались физические константы материала, полученные из эксперимента при малых деформациях. Данные приняты приемлемыми для проведения упрощенных расчетов при больших деформациях, но в дальнейших исследованиях потребуются уточнения физических констант материала с учетом физической и геометрической нелинейности.

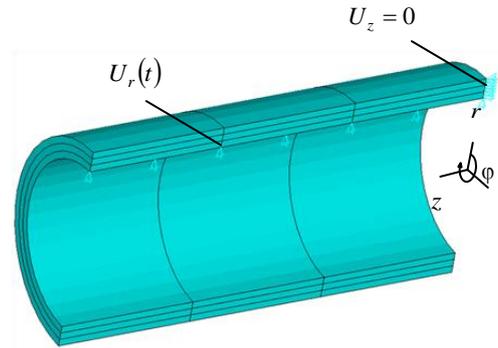


Рис. 5 Конечно-элементная модель и граничные условия для моделирования экспандинга

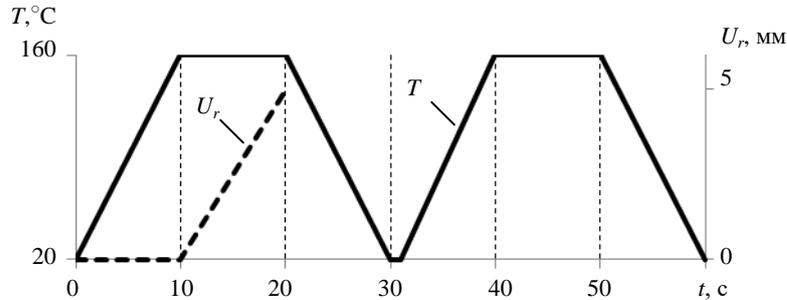


Рис. 6. Закон изменения температуры и радиальных перемещений во времени

3.1. Модификация вязкоупругой модели Прони для учета больших деформаций при выполнении расчетов программными средствами пакета ANSYS

Для учета больших деформаций при расчете в программном пакете ANSYS вязкоупругая модель Прони модифицируется вводом гиперупругой модели поведения для пружинных элементов в обобщенной модели тела Максвелла. Соотношение для больших деформаций, предложенное Симо [17], записывается через потенциал упругой энергии:

$$W(\mathbf{C}) = w(\bar{\mathbf{C}}) + U(J), \quad (13)$$

где \mathbf{C} — правый тензор деформаций Коши–Грина, $\bar{\mathbf{C}}$ — изохорная часть тензора \mathbf{C} , J — детерминант градиента деформации. Второе напряжение Пиола–Кирхгофа в пружинных элементах Максвелла определяется выражением:

$$S_i = 2 \frac{\partial W}{\partial \mathbf{C}}, \quad (14)$$

а изменение напряжения при больших деформациях для напряжений элементов Максвелла имеет вид:

$$S'_i(t_1) = S'_i(t_0) \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_i^G}\right) + \alpha_i^G \exp\left(-\frac{\Delta t}{2\tau_i^G}\right) \left[\frac{dw}{d\mathbf{C}} \Big|_{t_1} - \frac{dw}{d\mathbf{C}} \Big|_{t_0} \right], \quad (15)$$

$$p_i(t_1) = p_i(t_0) \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_i^K}\right) + \alpha_i^K \exp\left(-\frac{\Delta t}{2\tau_i^K}\right) \left[\frac{dU}{dJ} \Big|_{t_1} - \frac{dU}{dJ} \Big|_{t_0} \right]. \quad (16)$$

Здесь: S'_i — компонента девиатора S_i ; p_i — компонента шаровой части S_i ; α_i^G — относительные модули сдвига для времен сдвиговой релаксации τ_i^G ; α_i^K — относительные модули изменения объема для времен объемной релаксации τ_i^K . При отсутствии объемной релаксации выражение (16) не используется.

В качестве потенциала упругой энергии выбран потенциал нео-Гука [13]:

$$W = \frac{\mu}{2}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2, \quad (17)$$

где W — энергия деформации на единицу эталонного объема, \bar{I}_1 — первый инвариант девиатора деформаций, μ — начальный модуль сдвига, $d = 2/K$ — параметр несжимаемости материала, J — детерминант градиента упругой деформации. Для несжимаемых материалов потенциал нео-Гука совпадает с потенциалом Треллара.

3.2. Свободная в осевом направлении заготовка

На первом шаге заготовка из сшитого полимера (Рис. 5) нагревается до температуры 160°C, что вызывает в образце температурные деформации. Затем к точкам на внутренней стороне трубки прикладываются радиальные перемещения, моделирующие величину ее расширения. При этом образуются угловые растягивающие и сжимающие осевые и радиальные деформации (Рис. 7). Для сохранения полученной формы и размера заготовка охлаждается, но теряет только температурные деформации. После освобождения от закреплений накопленные деформации, вызванные механическим расширением трубки, практически не изменяются, при этом осевая остаточная деформация, характеризующая продольную усадку, составляет около –45%.

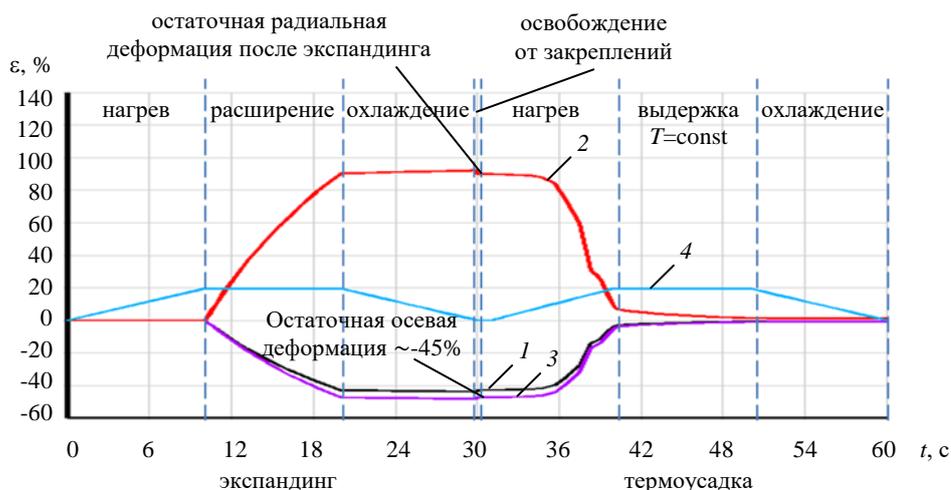


Рис. 7. Эволюция деформаций во времени, полученная по результатам упрощенного расчета: ε_r (кривая 1), ε_θ (2), ε_z (3), $\varepsilon_r \cdot 10$ (4)

Шаги операции термоусадки демонстрируют реализацию эффекта памяти формы. В условиях эксплуатации термоусаживаемые трубки насаживают на трубы или провода в местах соединений, требующих герметизации, и нагревают, например, с помощью горелки, от центральной части к концам. Добиться при этом равномерного нагревания трубки очень сложно. Кроме того, трение между термоусаживаемой трубкой и защищаемым изделием также вносит коррективы в конечные форму и размеры термоусаживаемой трубки.

Моделирование реального процесса термоусадки достаточно сложно, поэтому для простоты, с целью иллюстрации самого эффекта памяти формы, проводилось численное моделирование термоусадки готового изделия в целом в условиях простого нагрева. На рисунке 7 видно, что механические деформации стремятся к нулю, при этом трубка не подвергается никаким механическим воздействиям, а только тепловым. Материал демонстрирует так называемый релаксационный переход, который проявляется в резком уменьшении жесткости и времен релаксации, «размораживании» накопленных деформаций, тенденции избавиться от них. Вследствие этого изделие приобретает первоначальную форму и размеры. При дальнейшей выдержке деформации завершаются, нагрев изделия прекращается, оно охлаждается и теряет температурные деформации.

По полученным результатам можно сделать вывод, что при термоусадке изделие уменьшается в диаметре, при этом увеличиваются его толщина и длина, а это не соответствует реальному процессу термоусадки.

3.3. Начальная осевая фиксация исходной длины образца

В реальном процессе термоусадки, как правило, всегда присутствует не только уменьшение диаметра при нагреве, но и продольная осевая усадка порядка 15%, которая является нежелательным явлением при производстве и использовании термоусаживаемых трубок. Таким образом, встает задача определения причины и нахождения способа минимизации величины продольной усадки и, в наилучшем варианте, избавления от нее.

Авторами данного исследования сделано предположение, что продольная усадка возникает вследствие того, что в реальном экспандинге изделие испытывает не сжимающие продольные деформации, а растягивающие. Тогда при термоусадке в материале «размораживаются» как растягивающие

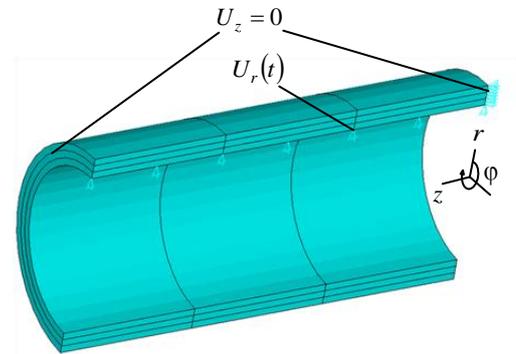


Рис. 8. Конечно-элементная модель и граничные условия для случая осевой фиксации

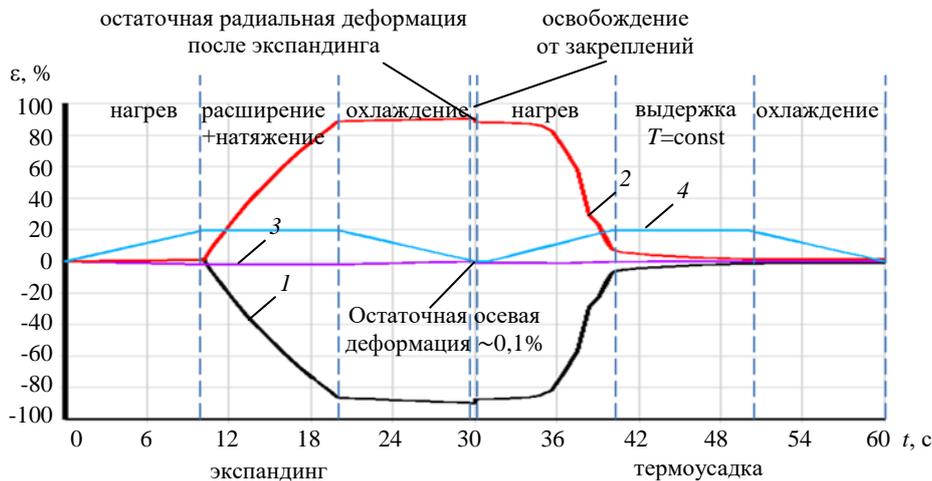


Рис. 9. Эволюция деформаций во времени, полученная при условии осевой фиксации заготовки: ϵ_r (кривая 1), ϵ_ϕ (2), ϵ_z (3), $\epsilon_r \cdot 10$ (4)

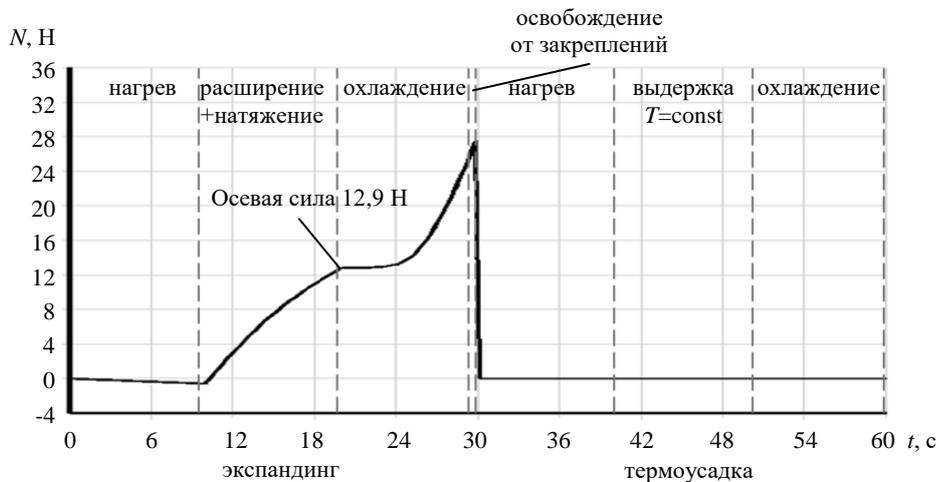


Рис. 10. Изменение во времени осевой силы, необходимой для выполнения условия отсутствия осевой деформации

радиальные, так и растягивающие осевые деформации, что приводит к усадке и в радиальном, и в осевом направлении. В статье предлагается обеспечить постоянство длины заготовки (Рис. 8) на шаге расширения путем приложения некоторой осевой силы N , что позволит снизить остаточную продольную деформацию

до $\sim 0,1\%$ (Рис. 9). В результате расчета была получена величина осевой силы, дающая возможность выполнить это условие. При завершении расширения заготовки величина продольной силы достигает значения 12,9 Н (Рис. 10). При отсутствии «замороженной» осевой деформации продольная усадка при термоусадке не наблюдается (Рис. 9). Таким образом, обеспечение осевой деформации, близкой к нулю, как на этапе экспандинга, так и при термоусадке, исключает образование усадки в продольном направлении. Установленный факт важен при применении готовых трубок на практике.

3.4. Начальная 15%-ная осевая деформация

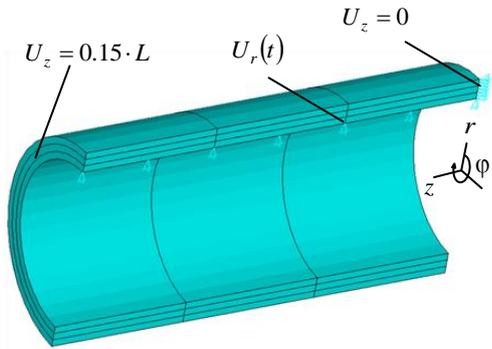


Рис. 11. Конечно-элементная модель и граничные условия с начальной 15%-ной осевой деформацией

Поскольку на реальном этапе термоусадки присутствует продольная осевая усадка $\sim 15\%$, можно предположить, что в процессе расширения действует осевая сила, превышающая значение 12,9 Н, при котором создается оптимальное растягивающее напряжение, обеспечивающее отсутствие продольной усадки. С целью определения значения действующей продольной силы численно решена задача, моделирующая этап экспандинга с условием приложения продольной силы такой величины, которая создавала бы в процессе расширения продольную деформацию 15% (Рис. 11, 12). В результате расчета получено значение осевой силы 15 Н (Рис. 13). Расчетное значение превышает оптимальное на ~ 2 Н.

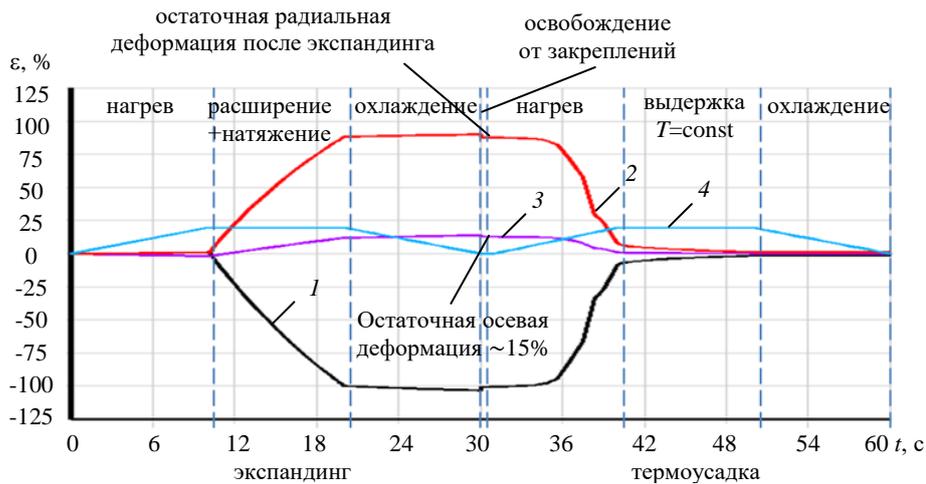


Рис. 12. Эволюция деформаций во времени, полученная при условии начальной 15%-ной осевой деформации: ε_r (кривая 1), ε_ϕ (2), ε_z (3), $\varepsilon_T \cdot 10$ (4)

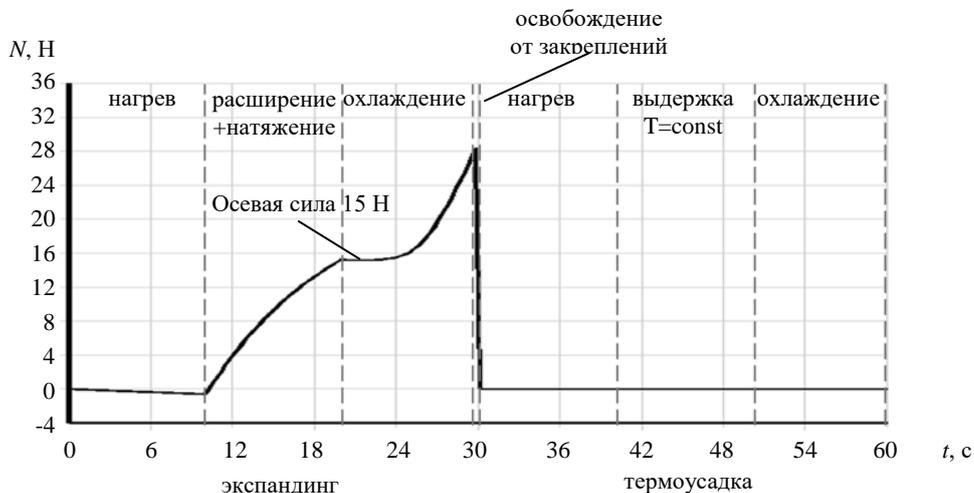


Рис. 13. Изменение во времени осевой силы, необходимой для создания начальной 15%-ной осевой деформации

3.5. Анализ сходимости численного решения

Сходимость численного решения оценивалась по относительной невязке двух последующих решений (Табл. 2). Видно, что при увеличении числа степеней свободы расхождение между двумя соседними решениями уменьшается, что свидетельствует о сходимости решения задачи.

Таблица 2 Относительная невязка двух последующих решений Δ , %

Типы ограничений в осевом направлении	Число степеней свободы	18	72	288	1152
	Свободная в осевом направлении заготовка		–	4,13	2,55
Начальная осевая фиксация исходной длины		–	3,89	1,86	1,76
Начальная 15%-ная осевая деформация		–	4,77	2,83	2,31

3.6. Промежуточные выводы

1. Причиной осевой усадки является слишком большая величина осевой силы.
2. Для уменьшения осевой усадки необходимо:
 - снижение осевого усилия при расширении на этапе экспандинга на 2 Н;
 - скорости подачи и извлечения трубчатой заготовки из экспандера должны быть равными.

4. Моделирование экспандинга

Программными средствами пакета ANSYS проведено численное моделирование технологического этапа экспандинга трубки, приближенное к реальному процессу производства. Трубка из сшитого полиэтилена диаметром 10 мм и толщиной 0,3 мм нагревалась до температуры 160°C, затем подавалась в полость экспандера, где под давлением расширялась. При этом рассматривался достаточно длинный участок трубки (125 мм), на котором внешняя поверхность покрывалась контактными элементами Conta172. Поскольку при решении контактной задачи всегда используется пара элементов, в данном случае внутренняя поверхность экспандера состояла из элементов Target169. Задача решена без учета трения в области контакта, предполагалось скольжение полимерного материала по стенке, что находит подтверждение в некоторых работах, например см. [6]. Свойства материала и другие данные для расчета задавались теми же, что и в задаче с упрощенной постановкой. На рисунке 14 схематично изображены подача и движение заготовки в экспандере.

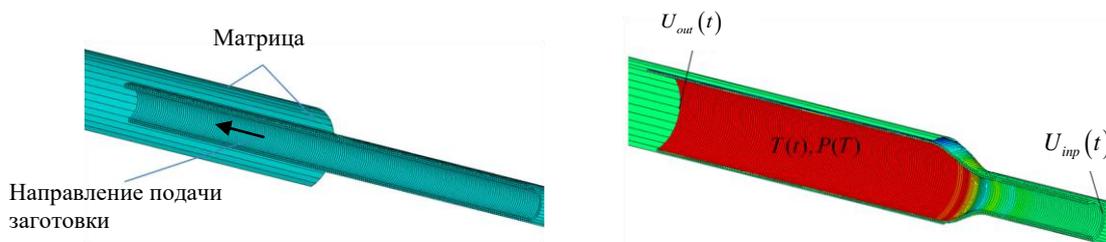


Рис. 14. Схематичное изображение движения заготовки через экспандер

Проведено два расчета:

- с учетом равенства скоростей прохождения трубки через вход и выход экспандера;
- с учетом удлинения заготовки на 15%.

4.1. Моделирование экспандинга с учетом равенства входной и выходной скоростей

В отличие от упрощенного расчета экспандинга заготовки в подразделе 3.3, где осевая фиксация заменялась приложением осевой силы такой величины, которая обеспечивала отсутствие осевой деформации, в приближенном расчете прямо задавалось равенство перемещений точек трубки на входе и выходе из экспандера. Затем, на основании результатов расчета, определялась действующая осевая сила; получилось значение — 13 Н, близкое к значению осевой силы, найденному в упрощенном расчете. На рисунке 15 представлены функции изменения осевой и температурной деформаций во времени. Остаточная продольная деформация после завершения этапа экспандинга составила 0,03%. На рисунке 16 изображены временные зависимости действующей осевой силы на входном и выходном торцах заготовки.

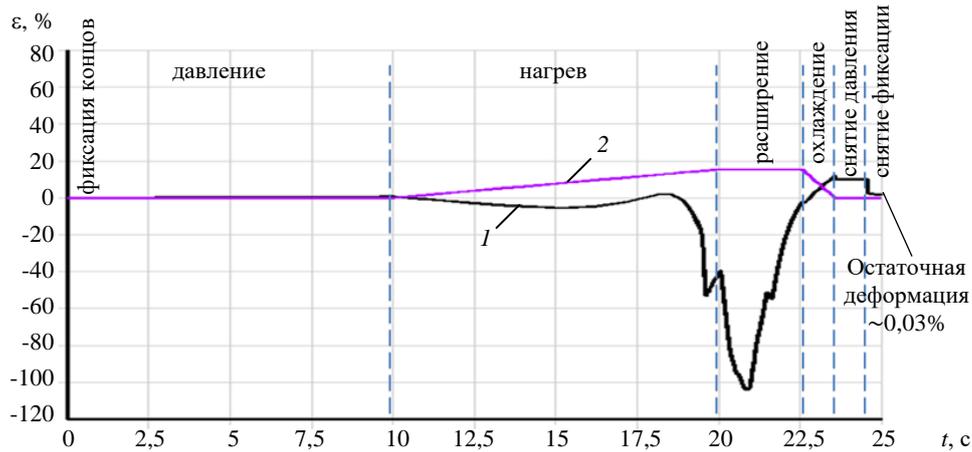


Рис. 15. Временные зависимости с учетом равенства скоростей на входе и выходе экспандера: продольная деформация (кривая 1), температурная деформация (2)

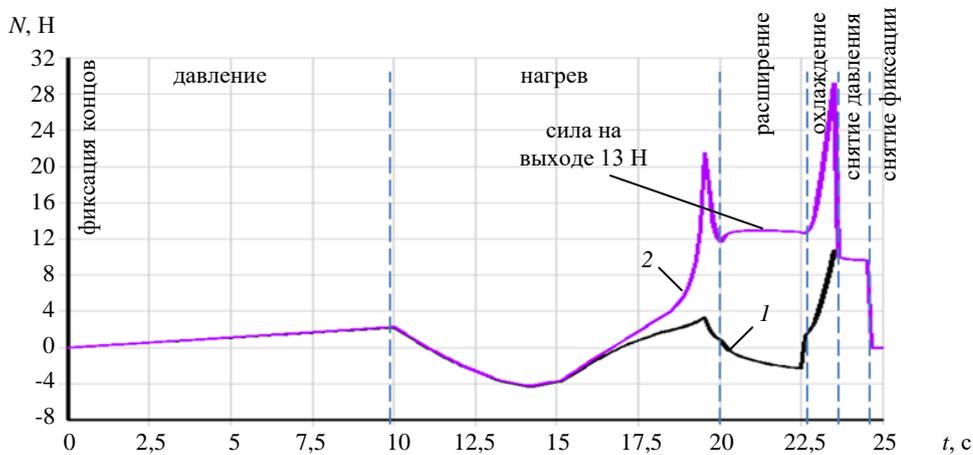


Рис. 16. Временные зависимости осевой силы, полученные с учетом равенства скоростей на входе и выходе экспандера: на входе (кривая 1), на выходном торце заготовки (2)

4.2. Моделирование экспандинга с учетом начального 15%-ного удлинения заготовки

При проведении расчета для случая начального 15%-ного продольного удлинения заготовки получены временные зависимости осевой и температурной деформаций (Рис. 17) и действующей осевой силы на входе в экспандер и выходе из него (Рис. 18). Расчетное значение осевой силы на выходе оказалось равным значению аналогичной силы в упрощенном расчете — 15 Н.

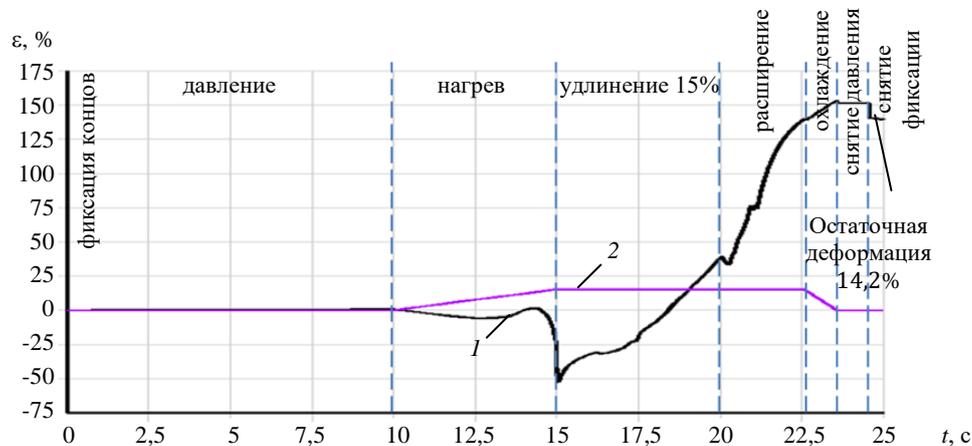


Рис. 17. Временные зависимости деформаций при задании начального 15%-ного удлинения: продольная деформация (кривая 1), температурная деформация (2)

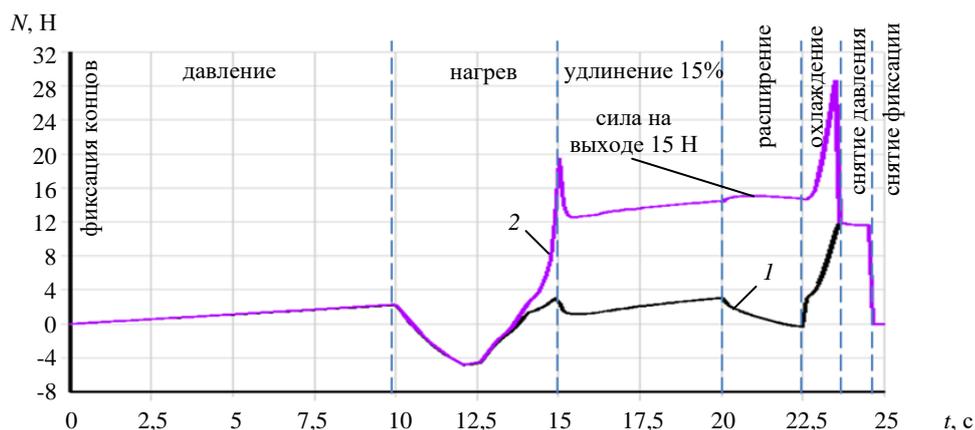


Рис. 18. Временные зависимости осевой силы при задании начального 15%-ного удлинения: на входе в экспандер (кривая 1), на выходе (2)

4.3. Анализ сходимости численного решения

В таблице 3 приведена величина относительной невязки двух последующих решений.

Таблица 3. Относительная невязка между двумя соседними решениями Δ , %

Вид моделирования экспандинга	Число степеней свободы	24	96	384	1536
	С учетом равенства входной и выходной скоростей		–	5,01	2,79
С учетом начального 15%-ного удлинения заготовки		–	5,19	3,04	2,76

4.4. Выводы

Итак, для уменьшения осевой усадки нужно реализовать следующие условия:

- уменьшить осевое усилие при расширении примерно на 2 Н;
- соблюдать условие равенства скоростей движения заготовки на входе в экспандер и выходе из него.

5. Заключение

В работе экспериментально определены параметры выбранной физической модели сшитого полиэтилена и проведены некоторые проверочные испытания. Выполнено упрощенное численное моделирование полного цикла для материала с памятью формы на примере изготовления термоусаживаемой трубки. Найдена причина осевой усадки и предложены пути ее уменьшения. Осуществлено численное моделирование реального технологического этапа экспандинга трубки и проведено сравнение с результатами упрощенного расчета.

Полученные результаты укрепили намерения авторов в необходимости дальнейших экспериментальных исследований для уточнения параметров физической модели сшитого полиэтилена при больших деформациях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края (проект №19-41-590008 p_a).

Литература

1. Lendlein A., Gould O.E.C. Reprogrammable recovery and actuation behavior of shape-memory polymers // Nat. Rev. Mater. 2019. Vol. 4. P. 116-133. <https://doi.org/10.1038/s41578-018-0078-8>
2. Ranganatha Swamy M.K., Mallikarjun U.S., Udayakumar V. Synthesis and characterization of shape memory polymers // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 577. 012095. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/577/1/012095>
3. Матвеевко В.П., Сметанников О.Ю., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н. Термомеханика полимерных материалов в условиях релаксационного перехода. М.: Физматлит, 2009. 176 с.
4. Онискив В.Д., Столбов В.Ю., Хатямов Р.К. Об одной задаче управления процессом гамма-облучения полиэтиленов // Прикладная математика и вопросы управления. 2019. № 3. С. 119-130.

5. Тихомирова К.А., Труфанов Н.А. Экспериментальное обоснование определяющих соотношений для аморфного полимера с памятью формы при больших деформациях // Вестник ПНИПУ. Механика. 2015. № 2. С. 151-163. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.2.10>
6. Малкин А.Я. Современное состояние реологии полимеров: достижения и проблемы // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2009. Т. 51, № 1. С. 106-136. (English version <https://doi.org/10.1134/S0965545X09010076>)
7. Li J., Duan Q., Zhang E., Wang J. Applications of shape memory polymers in kinetic buildings // Adv. Mater. Sci. Eng. 2018. Vol. 2018. 7453698. <https://doi.org/10.1155/2018/7453698>
8. Wang Z., Chang M., Kong F., Yun K. Optimization of thermo-mechanical properties of shape memory polymer composites based on a network model // Chem. Eng. Sci. 2019. Vol. 207. P. 1017-1029. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.07.022>
9. Каюмов Р.А., Страхов Д.Е. К вопросу моделирования действия эффекта памяти формы в полимерной муфте // НАУ. 2015. № 4-2. С. 107-111.
10. Arvanitakis A.I. A constitutive level-set model for shape memory polymers and shape memory polymeric composites // Arch. Appl. Mech. 2019. Vol. 89. P. 1939-1951. <https://doi.org/10.1007/s00419-019-01553-w>
11. Роговой А.А., Столбова О.С. Конечные деформации в сплавах и полимерах с памятью формы // Ученые записки КнАГТУ. 2018. Т. 1, № 3. С. 6-17.
12. Адамов А.А., Матвеев В.П., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н. Методы прикладной вязкоупругости. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 411 с.
13. Thanakhun K., Puttapitukporn T. PDMS material models for anti-fouling surfaces using finite element method // EJ. 2019. Vol. 23. P. 381-398. <https://doi.org/10.4186/ej.2019.23.6.381>
14. Шилько С.В., Гавриленко С.Л., Панин С.В., Алексеенко В.О. Определение реологических параметров полимерных материалов на основе идентификации вязкоупругой модели Прони по результатам статистических и динамических испытаний // Механика машин, механизмов и материалов. 2017. № 3 (40). С. 53-58.
15. Зачиняев Г.М., Кондратов А.П. Термоциклические испытания термоусадочных полимерных изделий с памятью формы // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81, № 10. С. 57-61.
16. Пособие по проектированию технологических трубопроводов из пластмассовых труб / НПО «Пластик». М.: Стройиздат, 1984. 144 с.
17. Simo J.C. On fully three-dimensional finite strain viscoelastic damage model: Formulation and computational aspects // Comput. Meth. Appl. Mech. Eng. 1987. Vol. 60. P. 153-173. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(87\)90107-1](https://doi.org/10.1016/0045-7825(87)90107-1)

References

1. Lendlein A., Gould O.E.C. Reprogrammable recovery and actuation behavior of shape-memory polymers. *Nat. Rev. Mater.*, 2019, vol. 4, pp. 116-133. <https://doi.org/10.1038/s41578-018-0078-8>
2. Ranganatha Swamy M.K., Mallikarjun U.S., Udayakumar V. Synthesis and characterization of shape memory polymers. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 577, 012095. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/577/1/012095>
3. Matveenko V.P., Smetannikov O. Yu., Trufanov N.A., Shardakov I.N. *Termomekhanika polimernykh materialov v usloviyakh relaksatsionnogo perekhoda* [Thermomechanics of polymer materials in a relaxation transition]. Moscow, Fizmatlit, 2009. 176 p.
4. Oniskiv V.D., Stolbov V.Iu., Hatiamov R.K. On one control problem of the process of gamma irradiation of the polyethylene. *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya – Applied Mathematics and Control Sciences*, 2019, no. 3, pp. 119-130.
5. Tikhomirova K.A., Trufanov N.A. Experimental calibration of constitutive model for an amorphous shape memory polymer under large deformations. *Vestnik PNIPIU. Mekhanika – PNIPIU Mechanics Bulletin*, 2015, no. 2, pp 151-163. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.2.10>
6. Malkin A.Ya. The state of the art in the rheology of polymers: Achievements and challenges. *Polym. Sci. Ser. A*, 2009, vol. 51, pp. 80-102. <https://doi.org/10.1134/S0965545X09010076>
7. Li J., Duan Q., Zhang E., Wang J. Applications of shape memory polymers in kinetic buildings. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 2018, 7453698. <https://doi.org/10.1155/2018/7453698>
8. Wang Z., Chang M., Kong F., Yun K. Optimization of thermo-mechanical properties of shape memory polymer composites based on a network model. *Chem. Eng. Sci.*, 2019, vol. 207, pp. 1017-1029. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.07.022>
9. Kayumov R.A., Strakhov D.E. The question of the simulation shape memory effect in polymer mufti. *NAU*, 2015, no. 4-2, pp. 107-111.
10. Arvanitakis A.I. A constitutive level-set model for shape memory polymers and shape memory polymeric composites. *Arch. Appl. Mech.*, 2019, vol. 89, pp. 1939-1951. <https://doi.org/10.1007/s00419-019-01553-w>
11. Rogovoi A.A., Stolbova O.S. Final deformations in alloys and polymers with memory of the shape. *Uchenyye zapiski KnAGTU – Scholarly Notes of KNASTU*, 2018, vol. 1, no. 3, pp. 6-17.
12. Adamov A.A., Matveyenko V.P., Trufanov N.A., Shardakov I.N. *Metody prikladnoy vyazkouprugosti* [Applied viscoelasticity methods]. Ekaterinburg: Uro RAN, 2003, 411 p.
13. Thanakhun K., Puttapitukporn T. PDMS material models for anti-fouling surfaces using finite element method. *EJ*, 2019, vol. 23, pp. 381-398. <https://doi.org/10.4186/ej.2019.23.6.381>

14. Shil'ko S.V., Gavrilenko S.L., Panin S.V., Aleksenko V.O. Determination of rheological parameters of polymer materials by identification of Prony viscoelastic model according to data of static and dynamic tests. *Mekhanikamashin, mekhanizmovimaterialov – Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2017, no. 3(40), pp. 53-58
15. Zachinyaev G.M., Kondratov A.P. Thermal cyclic tests of shrink polymeric products with the shape memory. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2015, vol. 81, no. 10, pp. 57-61.
16. *Posobiye po proyektirovaniyu tekhnologicheskikh truboprovodov iz plastmassovykh trub / NPO «Plastik»* [A guide for the design of technological pipelines from plastic pipes]. Moscow, Stroyizdat, 1984. 144 p. *Posobiye po proyektirovaniyu tekhnologicheskikh truboprovodov iz plastmassovykh trub / NPO «Plastik»*. M.: Stroyizdat,
17. Simo J.C. On fully three-dimensional finite strain viscoelastic damage model: Formulation and computational aspects. *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 1987, vol. 60, pp. 153-173. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(87\)90107-1](https://doi.org/10.1016/0045-7825(87)90107-1)

Поступила в редакцию 15.03.2020; после доработки 24.06.2020; принята к опубликованию 26.06.2020

Сведения об авторах

Сметанников Олег Юрьевич, дтн, доц., Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29а; e-mail: sou2009@mail.ru
Фасхутдинова Юлия Борисовна, б/с, асс., ПНИПУ; e-mail: fub26@mail.ru
Субботин Евгений Владимирович, дтн, доц., ПНИПУ; e-mail: e.subbotin81@mail.ru