

Ползучесть полимерных изделий

Б.М. Языев, И.А. Аль-Вали, М.А. Аль-Хадж.

Донской государственной технической университет

Аннотация: Ползучестью называют медленную пластическую (необратимую) деформацию изделия под действием созданного в материале напряжения. В данной статье рассмотрена ползучесть полимерных изделий. Ползучесть материала характеризуется опытной зависимостью деформации, получающейся под воздействием фиксированной нагрузки, от времени.

Ключевые слова: деформация материала, упругая деформация, высокоэластичная деформация, полимеры, вязкая деформация, пластическая деформация.

С точки зрения механики все взаимосвязи, существующие между элементарными частицами полимерных изделий и их комплексами, могут быть разделены на две категории. Во-первых, должны различаться связи жесткие, обеспечивающие полную передачу усилия и не изменяющиеся во времени. Эти возбуждаемые при деформации тела связи носят такой же упругий характер, что и внутримолекулярные связи. Характерной особенностью их является то, что они действуют на сближенных дистанциях в случае плотного расположения молекул. У полимеров в чистом виде они наблюдаются в кристаллическом и стеклообразном состоянии [1,2].

Во-вторых, надо учитывать наличие податливых связей, изменяющихся с течением времени. Податливые связи не обеспечивают жесткого соединения молекул. В отличие от упругих связей они могут существовать только в процессе относительного смещения молекул. Если молекулы относительно друг друга не перемещаются, то силы взаимодействия податливого характера между ними равны нулю.

В вязком состоянии, когда возможны перемещения центров тяжести молекул при сколько угодно малом значении внешнего усилия, все частицы вещества связаны только податливо. Но и вязкое тело обладает отличным от нуля пределом прочности, поскольку к нему всегда можно приложить усилие

при скорости деформирования, превышающей скорость ползучести. Если скорость приложения усилия уменьшить до нуля, будет до нуля уменьшаться и прочность. В чисто вязком состоянии вещество не имеет отличной от нуля длительной прочности. Примером таких веществ являются смолы, вар, битум и т. п. [3].

В высокоэластическом состоянии молекулы полимера имеют ограниченную подвижность, будучи заземленными частично, в некоторых точках. Это означает, что в высокоэластическом состоянии частицы полимера имеют связи обоих видов: некоторые из частиц соединены между собой жестко, некоторые — податливо, причем жесткие связи имеют непрерывность по всему объему элемента [4].

На схеме (рис. 1) показана часть молекулы полимера, состоящая из трех звеньев.

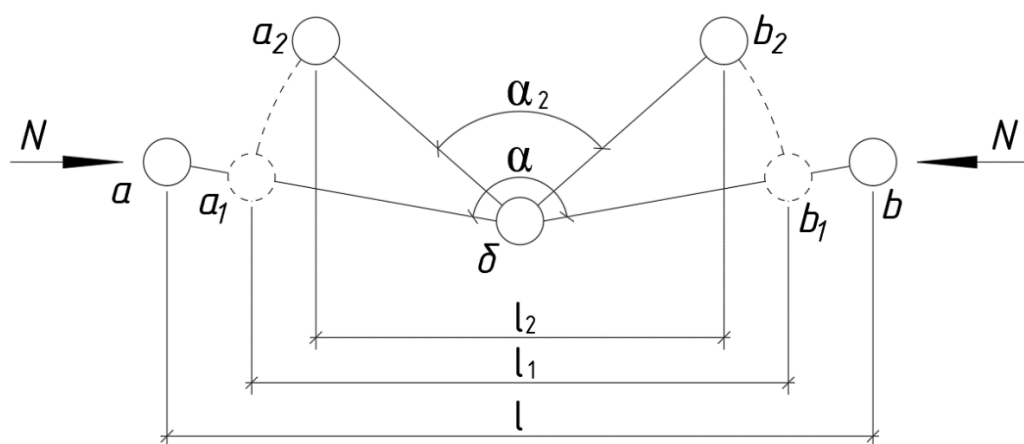


Рис. 1. Схема конфигурационного деформирования сегмента.

После приложения нагрузки сокращается расстояние между звеньями и изменяется угол α между валентными связями с вершиной (δ). Легко представить, например, такое положение, когда взаимодействие соседних молекул препятствует изменению угла, поэтому при загрузении изменяется

только длина звена и получается упругая деформация Δl_y :

$$\Delta l_y = l - l_1,$$

где Δl_y – упругая деформация; l – расстояние между звеньями до нагрузки; l_1 – расстояние между звеньями во время нагрузки [5].

В процессе длинного ряда соударений сегментов молекул по всему объему элемента с течением времени в области звеньев a_1 и b_1 могут образоваться «дырки», в результате чего появляется возможность перескока их в положение a_2 и b_2 , что и совершается при сохранении прежних расстояний a_2b и b_2b , поскольку сила продолжает действовать. В направлении силы образуется прирост деформации, составляющий высокоэластическую деформацию Δl_3 :

$$\Delta l_3 = l_1 - l_2,$$

где Δl_3 – высокоэластическая деформация; l_1 – расстояние между звеньями во время нагрузки; l_2 – расстояние между звеньями во время нагрузки [6].

Хотя сам перескок звеньев происходит практически мгновенно, время, которое требуется для того, чтобы появилась возможность для его осуществления, зависит от наличия «дырок» по всему объему элемента, т. е. от плотности и состояния вещества, от амплитуды тепловых колебаний, т. е. от температуры, от угла между внешней силой и сегментом, т. е. от положения молекулы, от наличия боковых связей химического средства и других факторов [7,8].

При снятии нагрузки описанные явления повторяются в обратном порядке. Первоначально сегмент удлинится — вернется упругая деформация, а затем с течением времени выпрямится — вернется частично или полностью высокоэластическая деформация. Возможность возврата деформации является причиной того, что высокоэластическую деформацию иногда

считают по природе упругой, но запаздывающей во времени, а само явление называется запаздывающей упругостью. Между тем природа этих деформаций принципиально различна. Для образования упругой деформации требуется только приложение силы, в то время как высокоэластическая деформация является непосредственным результатом тепловых колебаний молекул. Правильнее ту часть деформации молекулы, которая образуется в результате изменения ее формы, называть конфигурационной. Образование конфигурационной деформации — процесс конечный, он проявляется в затухающей ползучести [9].

В реальных условиях различные виды деформаций чаще всего встречаются вместе, накладываются друг на друга. [10].

Рассмотрим методику и алгоритм численного решения задачи о напряженно-деформированном состоянии полимерного цилиндрического элемента при двумерном осесимметричном нагружении.

Цилиндр длиной H , состоящий из N слоев по толщине, из Y слоев по высоте, отличающихся теплофизическими и физико-механическими свойствами, ограниченный внешним радиусом b и внутренним a .

Нагружение цилиндра определяют:

- неравномерное поле температур $T(r, z, t)$,
- набухание отдельных слоев,
- объемные силы,
- действующие на боковые поверхности и торцы нормальные нагрузки,
- защемление торцов,
- давление в зазорах между слоями и усилия, возникающие при механическом взаимодействии слоев.

Указанные факторы нагружения изменяются по длине и толщине

цилиндра.

Напряженное и деформированное состояние такого тела в любой момент времени должно удовлетворять:

уравнениям равновесия

$$\frac{1}{r} * \frac{\partial}{\partial r} * (r\delta_z) - \frac{\delta_b}{r} + \frac{\partial trz}{\partial z} = R, \quad \frac{1}{r} * \frac{\partial}{\partial r} * (rtrz) + \frac{\partial \delta z}{\partial z} = P \quad (1)$$

и уравнениям совместной деформации

$$l_r = \frac{\partial u}{\partial r}; \quad l_o = \frac{u}{r}; \quad l_z = \frac{\partial w}{\partial z}; \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \quad (2)$$

Где R, P, U, W - составляющие объемных сил и перемещений.

Полные деформации рассматриваются как суммы деформаций: упругих (l_r^l, \dots), пластических (l_r^p, \dots), ползучести (l_r^c, \dots), распухания (l_r^v, \dots), и температурного расширения (αT).

$$l_r = l_r^l + l_r^p + l_r^c + l_r^v + \alpha T, \quad \gamma_{rz} = \gamma_{rz}^l + \gamma_{rz}^p + \gamma_{rz}^c \quad (3)$$

Компоненты упругой деформации выражаются через напряжения обобщенным законом Гука:

$$l_r^l = \frac{1}{E} [\delta_r - \mu(\delta_o + \delta_z)], \quad \gamma_{rz}^l = \frac{2(1+\mu)}{E} Trz \quad (4)$$

где E - модуль упругости, μ - коэффициент Пуассона. Для определения пластических деформаций используем соотношения теории пластического течения:

$$\alpha l_z^p = \alpha \lambda (\delta_z - \delta), \quad \alpha \gamma_{rz}^p = 2\alpha \lambda t_{rz} \quad (5)$$

$$\delta = \frac{\delta_z + \delta_o + \delta_z}{3} \quad \text{- среднее напряжение,}$$

$\alpha \lambda$ - скалярный параметр, характеризующий свойства материала.

Деформации ползучести определим из соотношений, предполагающих пропорциональность компонент тензоров напряжений и скоростей деформации ползучести:

$$l_r^c = \psi(\delta_r - \delta), \quad \gamma_{rz}^c = 2\psi t_{rz} \quad (6)$$

где ψ скалярная функция, зависящая от скалярных параметров, которые связаны с временем, температурой.

Приведенную систему уравнений (1.1 - 1.6), независимо от способа задания граничных условий» удобно решать в перемещениях. Для вычисления пластических деформаций и деформаций ползучести рассмотрим процесс нагружения, используя в качестве параметре время T . Пусть значения пластических составляющих компонент деформаций в момент T равны $l_r^p(T)$, $l_o^p(T)$, $l_z^p(T)$, а значения деформаций ползучести - $l_r^c(T)$, $l_o^c(T)$, $l_z^c(T)$.

Тогда значения в текущий момент $T+\Delta T$ определим из соотношений

$$l_r^p(T+\Delta T) = l_r^p(T) + \int_T^{T+\Delta T} \frac{\alpha\lambda}{\alpha T} (\delta_r - \delta) \alpha T, \quad \gamma_{rz}^p(T+\Delta T) = \gamma_{rz}^p(T) + 2 \int_T^{T+\Delta T} \frac{\alpha\lambda}{\alpha T} T_{rz} \alpha T \quad (7)$$

При достаточно малом ΔT , заменяя интегралы в (1.7) приближенно квадратурными формулами (например, по формулам прямоугольников), получим:

$$l_r^p(T+\Delta T) = l_r^p(T) + K(2\delta_r + \delta_o + \delta_z), \quad \gamma_{rz}^p(T+\Delta T) = \gamma_{rz}^p(T) + 6KT_{rz}(T+\Delta T) \quad (8)$$

$$\text{где } K = \frac{\Delta T \alpha \lambda (T + \Delta T)}{3\alpha T} \text{ - новый скалярный параметр. Определяемая таким}$$

образом величина K не накладывает ограничений на характер упрочнения материала.

Компоненты деформаций ползучести вычисляются по соотношениям:

$$l_r^c(T+\Delta T) = l_r^c(T) + 3F(\delta_z(T+\Delta T) - \delta(T+\Delta T)), \quad \gamma_{rz}^c(T+\Delta T) = \gamma_{rz}^c(T) + 6FT_{rz} \quad (9)$$

$$\text{где } F = \frac{\psi \Delta T}{3}$$

Распухание и температурное расширение вычисляется отдельно и для задачи является внешними данными величинами.

Из уравнений (3), (4), (8) и (9) получим для момента $(T+\Delta T)$

$$l_r = (T + \Delta T) = l_r^l(T + \Delta T) + l_r^p(T) + l_r^c(T) + (K + F)(2\delta_r - \delta_o - \delta_z) + l_r^v(T + \Delta T) + \alpha T(T + \Delta T) - \alpha_o T_o$$
$$\gamma_{rz} = (T + \Delta T) = \gamma_{rz}^l(T + \Delta T) + \gamma_{rz}^p(T) + \gamma_{rz}^c(T) + 6(K + F)T_{rz}(T + \Delta T) \quad (10)$$

Используя уравнения совместности деформаций (1.2), разрешим уравнения (10) относительно напряжений, тогда физический закон связи напряжений и деформаций запишется в виде:.

$$\delta_r(T + \Delta T) = \frac{E}{1 + \mu + 3(K + F)E} \left\{ \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\mu + (K + F)E}{1 - 2\mu} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) - l_r^p(T) - l_r^c(T) - l_r^v(T + \Delta T) - \right.$$
$$\left. - \frac{\mu + (K + F)E}{1 - 2\mu} (l_r^v + l_o^v + l_z^v) - \frac{1 + \mu + 3(K + F)E}{1 - 2\mu} (\alpha T(T + \Delta T) - \alpha T(0)) \right\},$$
$$T_{rz}(T + \Delta T) = \frac{E}{2[1 + \mu + 3(K + F)E]} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} - \gamma_{rz}^p(T) - \gamma_{rz}^c(T) \right) \quad (11)$$

Таким образом задача определения напряженно-деформированного состояние сводится к решению системы уравнений (1), (11).

Литература

1. Болотин В. В. Динамическая устойчивость упругих систем. — М.: Гостехиздат, 1956. — 600 с.
2. Ильюшин А. А. Механика сплошной среды. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. — 287 с.
3. Andreev Vladimir I., Yazyev Batyr M., Chepurnenko Anton S. On the Bending of a Thin Plate at Nonlinear Creep. Advanced Materials Research Vol. 900, 2014. pp. 707–710. Trans Tech Publications, Switzerland.
4. Шматко В.А., Мясоедова Т.Н., Моисеева Т.А., Чечеватов А.И., Яловега Г.Э., Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5478
5. Лазоренко Г.И., Каспржицкий А.С., Ольховатов Д.В., Кухарский А.В. Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5345

6. Андреев В.И. Некоторые задачи и методы механики неоднородных тел: Монография. – М.: Издательство АСВ, 2002. – 288 стр.
7. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. - М.: ГРФМЛ, 1984. - 521 с.
8. Липатов Ю.С. Межфазные явления в полимерах. - Киев: Наукова думка. 1980. – 265 с.
9. Andreev Vladimir I., Chepurnenko Anton S., Yazyev Batyr M.. Energy Method in the Calculation Stability of Compressed Polymer Rods Considering Creep. Advanced Materials Research Vols. 1004–1005, 2014. pp. 257–260. Trans Tech Publications, Switzerland.
10. Работнов Ю. Н. Сопротивление материалов. — М.: Физматгиз, 1962. - 456 с.

References

1. Bolotin V. V. Dinamicheskaja ustojchivost' uprugih sistem [Dynamic stability of elastic systems]. М.: Gostehizdat, 1956. 600 p.
2. Il'jushin A. A. Mehanika sploshnoj sredy. [Mechanics of continuous medium]. М. Izdvo Mosk. unta, 1978. 287 p.
3. Andreev Vladimir I., Yazyev Batyr M., Chepurnenko Anton S. On the Bending of a Thin Plate at Nonlinear Creep. Advanced Materials Research Vol. 900, 2014. pp. 707-710. Trans Tech Publications, Switzerland.
4. Shmatko V.A., Myasoedova T.N., Moiseeva T.A., Chechevatov A.I., Yalovega G.E. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5478
5. Lazorenko G.I., Kasprzhickij A.S., Ol'hovatov D.V., Kuharskij A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5345
6. Andreev V.I. Nekotorye zadachi i metody mehaniki neodnorodnyh tel



[Some problems and methods of mechanics of inhomogeneous bodies]:
Monografija. M.: Izdatel'stvo ASV, 2002. 288 p.

7. Bell Dzh. F. Jeksperimental'nye osnovy mehaniki deformiruemyh tverdyh tel [Experimental foundations of the mechanics of deformable solids]. M.: GRFML, 1984. 521 p.

8. Lipatov Ju.S. Mezhfaznye javlenija v polimerah [Interfacial phenomena in polymers]. Kiev: Naukova dumka. 1980. 265 p.

9. Andreev Vladimir I., Chepurnenko Anton S., Yazyev Batyr M. Energy Method in the Calculation Stability of Compressed Polymer Rods Considering Creep. Advanced Materials Research Vols. 1004-1005, 2014. pp. 257-260. Trans Tech Publications, Switzerland.

10. Rabotnov Ju. N. Soprotivlenie materialov [Resistance of materials]. M.: Fizmatgiz, 1962. 456 p.