

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Предисловие..... | 7 |
| Введение | 8 |
| Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДЕФОРМАЦИЯХ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ НАГРУЗКАХ | 10 |
| 1.1. Краткие сведения о деформациях ползучести. Количественные параметры | 11 |
| 1.2. Литературные сведения по аналитическому описанию деформируемости полимерных материалов при постоянных во времени сжимающих напряжениях | 16 |
| 1.3. Постановка и направление исследований | 28 |
| Библиографический список..... | 29 |
| Глава 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИСТИРОЛЬНОГО ПЕНОПЛАСТА КАК ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ | 32 |
| 2.1. Методика исследований | 33 |
| 2.2. Методика математико-статистической обработки данных испытаний на кратковременное сжатие | 35 |
| 2.3. Результаты испытаний полистирольных пенопластовых (EPS) при одновременном сжатии, выполненном при организации длительных экспериментов на ползучесть..... | 37 |
| Библиографический список..... | 45 |
| Глава 3. ПОЛЗУЧЕСТЬ ПОЛИСТИРОЛЬНОГО ПЕНОПЛАСТА ПРИ ПОСТОЯННЫХ СЖИМАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯХ..... | 47 |
| 3.1. Методика исследований | 47 |
| 3.2. Математико-статистическая обработка экспериментальных результатов длительных испытаний | 50 |
| 3.3. Исследование ползучести пенополистирольных плит по методике EN и ГОСТ | 55 |
| 3.4. Оценка ползучести пенополистирольных плит при постоянном сжатии на базе прямого эксперимента с частичным использованием прогностических значений деформаций ползучести | 64 |
| 3.5. Аналитическое описание деформации ползучести полистирольного пенопласта при постоянной сжимающей нагрузке | 77 |
| 3.6. Деформируемость полистирольного пенопласта EPS 200 при постоянном напряжении сжатия | 93 |

| | |
|--|------------|
| 3.7. Исследование ползучести полистирольного пенопласта (EPS) с использованием статистического планирования эксперимента..... | 104 |
| Библиографический список..... | 134 |
| Глава 4. ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НА БОЛЬШИЕ ВРЕМЕНА ДЕФОРМАЦИИ ПОЛЗУЧЕСТИ ПОЛИСТИРОЛЬНОГО ПЕНОПЛАСТА ПОД СЖИМАЮЩЕЙ НАГРУЗКОЙ..... | 137 |
| 4.1. Аналитическое описание процесса ползучести зависимостью Финдли (W.N. Findley)..... | 137 |
| 4.2. Аналитическое описание процесса ползучести экспоненциальной моделью..... | 155 |
| Библиографический список..... | 172 |
| Глава 5. ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИСТИРОЛЬНОГО ПЕНОПЛАСТА (EPS) В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ..... | 175 |
| Библиографический список..... | 191 |
| Глава 6. РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОЛИСТИРОЛЬНОМ ПЕНОПЛАСТЕ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ..... | 193 |
| 6.1. Исследование релаксации напряжения в полистирольном пенопласте в условиях одноосного сжатия..... | 193 |
| 6.2. Исследование релаксации напряжения в полистирольном пенопласте с использованием статистического планирования эксперимента..... | 206 |
| Библиографический список..... | 228 |
| Глава 7. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛЗУЧЕСТИ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА ПРИ ПОСТОЯННОЙ СЖИМАЮЩЕЙ НАГРУЗКЕ..... | 231 |
| 7.1. Методы технического прогнозирования. Терминология..... | 234 |
| 7.2. Регрессия и прогнозирование..... | 237 |
| Библиографический список..... | 248 |
| Глава 8. ДОВЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ПРОГНОЗА И СИНТЕЗ ПРОГНОЗНЫХ ОЦЕНОК ДЕФОРМАЦИИ ПОЛЗУЧЕСТИ ПОЛИСТИРОЛЬНОГО ПЕНОПЛАСТА ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ СЖАТИИ..... | 251 |
| Библиографический список..... | 267 |

| | |
|--|-----|
| Глава 9. ПРОГНОЗ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛЗУЧЕСТИ ПОЛИСТИРОЛЬНОГО ПЕНОПЛАСТА НА БОЛЬШИЕ ВРЕМЕНА ПРИ ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ СЖАТИЯ (на примере податливости при ползучести) | 269 |
| 9.1. Точечные прогностические оценки податливости при ползучести | 269 |
| 9.2. Доверительные интервалы прогноза и синтез прогностических оценок податливости при ползучести | 296 |
| Библиографический список..... | 316 |
| Глава 10. ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИИ ПОЛЗУЧЕСТИ ПОЛИСТИРОЛЬНОГО ПЕНОПЛАСТА (EPS) ПРИ ПОСТОЯННОМ СЖАТИИ | 318 |
| Библиографический список..... | 334 |
| Глава 11. ГИПОТЕТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛЗУЧЕСТИ ПОЛИСТИРОЛЬНОГО ПЕНОПЛАСТА (EPS) ПРИ ПОСТОЯННОМ СЖИМАЮЩЕМ НАПРЯЖЕНИИ НА ОСНОВАНИИ НАЧАЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПЕРИОДА ДЕФОРМИРОВАНИЯ | 336 |
| Библиографический список..... | 354 |
| Глава 12. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ (РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ) ПОЛИСТИРОЛЬНОГО ПЕНОПЛАСТА ПРИ ПОСТОЯННОМ СЖАТИИ | 355 |
| SUMMARY. CREEP OF EXPANDED POLYSTYRENE (EPS) UNDER CONSTANT COMPRESSIVE STRESS..... | 364 |
| Приложение А (информационное) | 370 |

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая монография посвящена исследованию ползучести пенополистирола при постоянных сжимающих напряжениях. Впервые обобщаются результаты длительных (5,5-годичных) испытаний полистирольного пенопласта при постоянном сжимающем напряжении $\sigma_c = (0,2-0,45)\sigma_{10\%}$.

Осуществлено прогнозирование деформаций ползучести при постоянном сжатии на большие времена (10, 25, 50 лет) с определением доверительных интервалов прогноза. Уделено внимание методическим особенностям определения доверительных интервалов для прогностических значений деформаций ползучести пенополистирола. Результаты этой части работы представляют практический и теоретический интерес, так как сведения, имеющиеся в литературе по этому вопросу, весьма противоречивы.

Представлены не только экспериментальные результаты исследований ползучести полистирольного пенопласта, но при прогнозе деформаций ползучести их величина представлена во взаимосвязи со свойствами материала, определяющими его ползучесть. В качестве характеристик, определяющих длительную деформируемость пенополистирола при постоянной сжимающей нагрузке, выбраны плотность ρ , прочность на сжатие $\sigma_{10\%}$, начальный модуль упругости E при сжатии, а также величина постоянно сжимающего напряжения σ_c .

Представлены экспериментальные исследования релаксации напряжений во времени при фиксированных постоянных деформациях сжатия от 1 до 25 %.

Авторы надеются, что книга не только будет полезной для исследователей, но и послужит источником современной информации по рассмотренным примерам для инженеров-практиков.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение в строительстве ограждающих конструкций с полистирольным пенопластом (EPS) в качестве теплоизоляционно-конструкционного заполнителя требует тщательного анализа работы пенополистирола в конструкциях на всех стадиях изготовления и эксплуатации с учетом длительных процессов. При расчетах конструкций часто принимается допущение об идеальной упругости материала, которое при одноосном напряженно-деформированном состоянии выражается законом Гука $\varepsilon = \sigma/E$.

Представление об идеальной упругости материала, положенное в основу классической теории упругости для пенополистирола, достаточно хорошо отвечает опытам при кратковременных нагрузках и не очень высоком уровне напряжений. Однако при длительном действии нагрузки даже относительно невысокого уровня полистирольный пенопласт обнаруживает способность деформироваться во времени при постоянных напряжениях (ползучесть) или изменять уровень напряжений при заданной постоянной деформации (релаксация). Отмеченное свойство приводит к тому, что в пенополистироле даже при постоянных нагрузках (деформациях) происходит изменение во времени деформаций (или напряжений), которое может оказаться весьма существенным. Эти эффекты не могут быть учтены законом Гука.

По-видимому, не вызывает сомнения тот факт, что для эффективного применения пенополистирола как конструкционного материала необходимо изучение явления ползучести. Современные сведения о ползучести пенополистирола основаны на экспериментальных данных, без накопления и анализа которых немислимо их дальнейшее развитие.

Исследованиям ползучести полистирольного пенопласта при действии постоянных во времени сжимающих напряжений и посвящена настоящая работа. Интерес к исследованию процесса деформирования, развивающегося при постоянном нагружении, связан прежде всего с требованиями практики, поскольку полистирольный пенопласт в условиях эксплуатации может подвергаться действию постоянной нагрузки.

В выполненных исследованиях сделана попытка осветить ползучесть пенополистирола при постоянных сжимающих напряжениях путем анализа результатов экспериментов, выполненных ав-

торами в научном институте строительных материалов (бывшем Научном институте термоизоляции) ВТУ им. Гедиминаса и в Национальном исследовательском Московском государственном строительном университете.

В тесной связи с ползучестью пенополистирола находится его свойство релаксации напряжения при сохранении постоянной величины сообщенной ему деформации.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований ползучести полистирольного пенопласта (EPS) при постоянных во времени сжимающих напряжениях и релаксации напряжений при фиксированных постоянных деформациях сжатия. Изложены различные подходы к формулированию эмпирических уравнений деформаций ползучести (релаксации напряжений), определены константы, входящие в эти уравнения. Основная часть работы посвящена экспериментальным исследованиям ползучести пенопласта при сжимающих напряжениях в интервале (25–45 %) его прочности на сжатие при 10%-ной линейной деформации. Осуществлено прогнозирование на большие времена (10, 25, 50 лет) деформаций ползучести при постоянном сжатии с определением доверительных интервалов прогноза. Величины деформаций ползучести приводятся во взаимосвязи со свойствами материала, определяющими его ползучесть. В качестве характеристик, определяющих длительную деформируемость пенополистирола при постоянной сжимающей нагрузке, выбраны его плотность ρ , прочность на сжатие $\sigma_{10\%}$, начальный модуль упругости при сжатии E , а также величина постоянно сжимающего напряжения σ_c .

При силовом воздействии на пенополистирол в нем обнаруживаются деформации, носящие необратимый характер. Установлена необратимость деформаций ползучести при постоянных сжимающих напряжениях, степень которой зависит от величины полной деформации при длительном сжимающем напряжении σ_c , равном $(0,25 \text{ и } 0,35)\sigma_{10\%}$, действующем в течение 5 лет.

Эксперименты выполнены согласно рекомендациям EN 13163 по методам испытаний. Подход к изучению деформаций ползучести пенополистирола является феноменологическим, то есть в результате внешних силовых воздействий осуществлено рассмотрение реологического поведения тела (пенополистирольного образца) в целом.

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДЕФОРМАЦИЯХ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ НАГРУЗКАХ

Широкое применение в строительстве полистирольного пенопласта (EPS) в качестве теплоизоляционно-конструкционного заполнителя требует анализа свойств пенополистирола с учетом длительных процессов.

Полистирольный пенопласт (EPS) представляет собой материал, поведение которого при быстром (мгновенном) нагружении хорошо подчиняется обобщенному закону Гука. При длительном действии нагрузки он обладает свойством ползучести, то есть проявляет склонность к неупругим, лишь частично обратимым при разгрузке деформациям.

Экспериментальными исследованиями установлено, что на величину деформаций ползучести влияют: свойства исходных материалов; размеры образцов; температура и влажность окружающей среды; величина напряжений и вид напряженного состояния; длительность нагружения, а также ряд других факторов [45, 46]. В тесной связи с ползучестью пенополистирола находится его склонность к релаксации напряжений при сохранении постоянной величины сообщенной ему деформации [10, 34]. Если пенополистирол (элемент) находится в таком деформированном состоянии, при котором дальнейший процесс деформирования невозможен, то деформации ползучести, неизбежно развивающиеся при действии напряжений, должны гаситься непрерывным уменьшением начальных упругих деформаций, в результате чего напряжения в пенополистироле также постепенно уменьшаются, то есть релаксируют.

Ползучесть и связанная с ней способность к релаксации напряжений — весьма важные свойства пенополистирола, которые необходимо учитывать при расчете конструкционного пенополистирола на длительные нагрузки, изменения температуры или влажности. Теория ползучести развивается как феноменологическая, то есть основанная на объективном отражении данных экспериментальных исследований, освещающих различные аспекты этой проблемы, и будет оставаться таковой. Поэтому для дальней-

шего развития и совершенствования сведений о ползучести важно всестороннее изучение ее в различных условиях загрузки, а также факторов, оказывающих на нее влияние, чтобы можно было управлять этим явлением и учитывать его. Подход к изучению деформаций материала является феноменологическим, то есть осуществлено рассмотрение реологического поведения тела (образцов пенополистирола) в целом без вникания во внутреннее строение материала и происходящие в его структуре изменения при постоянных сжимающих напряжениях.

Основная часть работы посвящена экспериментальным исследованиям ползучести пенопласта при сжимающих напряжениях в интервале $(0,25-0,45)\sigma_{10\%}$ и постановке длительных экспериментов. Осуществлено прогнозирование на большие времена деформаций ползучести при длительном сжатии с определением доверительных интервалов прогноза.

Представлены также экспериментальные исследования релаксации напряжений во времени при фиксированных постоянных деформациях сжатия от 1 до 25 %.

В работе приводятся эмпирические уравнения деформаций ползучести (релаксации напряжений), определены константы, входящие в эти уравнения. Авторы надеются, что набор фактических данных будет полезным для выработки единой методики аналитического описания процесса ползучести конструкционных полистирольных пенопластов (EPS) и его прогнозирования на длительное время.

1.1. Краткие сведения о деформациях ползучести. Количественные параметры

Ползучесть полистирольного пенопласта — это происходящее во времени нарастание деформаций при воздействии постоянного напряжения. Ползучесть приводит к тому, что в каждый момент времени t полная относительная деформация состоит из начальной (упругой) деформации и деформации ползучести [17]:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_c(t). \quad (1.1)$$

От каждой добавки напряжения $\Delta\sigma_c$ возникает дополнительная упругая деформация $\Delta\varepsilon_0$ и к моменту времени t — дополнительная

деформация ползучести $\Delta \varepsilon_c(t)$. Полная относительная деформация к моменту времени t [47]

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_c(t) + \sum \Delta \varepsilon_0 + \sum \Delta \varepsilon_c(t). \quad (1.2)$$

Абсолютное значение деформации ползучести, как и упругой деформации, зависит от величины действующего напряжения. Зависимость между деформациями ползучести и напряжениями для пенополистирола в общем случае нелинейна.

Интенсивное нарастание деформаций ползучести происходит примерно в течение первых 7 суток после нагружения. Затем рост их замедляется: обычно после 65 сут выдержки нагрузки деформации делаются малозаметными.

На рисунке 1.1 изображены кривые, соответствующие различным значениям начальных напряжений ($\sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$). Большим напряжениям соответствуют пропорционально большие упругие деформации и деформации ползучести.

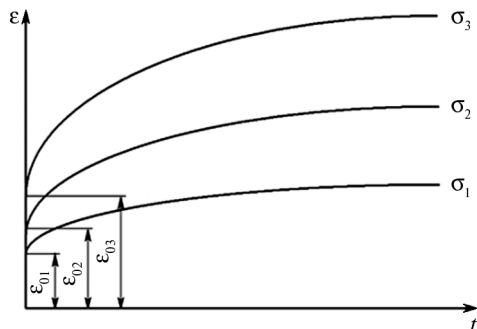


Рис. 1.1. Кривые ползучести, соответствующие разным значениям начальных сжимающих напряжений

На рисунке 1.2 показана кривая, описывающая процесс деформации полистирольного образца, находившегося под воздействием постоянной нагрузки, которая снята в момент времени t_n .

При разгрузке некоторая часть полной деформации $\varepsilon(t)$ исчезает, то есть происходит частичная обратимость деформации. Обратимая деформация состоит из мгновенно исчезающей упругой части ε_1 и исчезающей в течение некоторого отрезка времени вязкой

части ε_2 . Остаточная часть деформации ε_3 есть собственно пластическая деформация. Таким образом, пенополистирол является упруго-вязко-пластическим материалом.

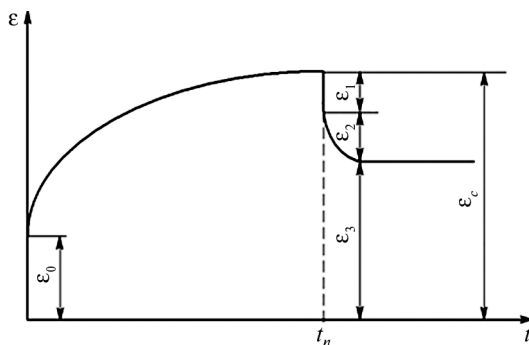


Рис. 1.2. Кривая, описывающая процесс деформации пенополистирольного образца, находящегося при постоянной сжимающей нагрузке, которая снята в момент времени t_n

Упругая часть обратимой деформации несколько отличается от возникшей от нагрузки начальной упругой деформации в результате изменения во времени модуля упругости. Следовательно, упругая часть обратимой деформации

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 \frac{E_0}{E_{t_n}}, \quad (1.3)$$

где E_0 — начальный модуль упругости; E_{t_n} — модуль упругости в момент времени t_n .

На процесс ползучести оказывают влияние разнообразные факторы. В частности, величина действующего напряжения, как уже указывалось, отражается на абсолютных значениях деформаций ползучести. Количественно деформация ползучести может измеряться податливостью* при ползучести или характеристикой ползучести.

Податливость при ползучести $I_c(t)$ — удельная относительная деформация ползучести в момент времени t , вызванная единичным

* При описании длительной деформируемости других строительных материалов (бетон и железобетон, древесина и др.) рассматривается как мера ползучести.

напряжением, приложенным в момент времени t_0 (принимается момент нагружения):

$$I_c(t) = \frac{\varepsilon_c(t)}{\sigma_c}, \text{ МПа}^{-1}. \quad (1.4)$$

Податливость при ползучести $I_c(t)$, имеющая размерность МПа^{-1} , является возрастающей функцией времени t , то есть с увеличением длительности выдерживания пенополистирола под нагрузкой растет и податливость при ползучести. Это возрастание теоретически продолжается безгранично, причем с затуханием ползучести податливость при ползучести стремится асимптотически к предельному значению.

В расчетной практике удобнее оперировать безразмерной характеристикой ползучести. Последняя представляет собой отношение деформации ползучести в момент времени t к упругой деформации, возникшей от нагрузки σ_c , приложенной в момент времени t_0 :

$$\varphi(t) = \frac{\varepsilon_c(t)}{\varepsilon_0}. \quad (1.5)$$

При нахождении значений податливости при ползучести часто можно обойтись без определения упругой деформации. Достаточно из отсчета по измерительному прибору в момент времени t вычесть отсчет в момент окончания нагружения и разность разделить на действующее напряжение σ_c . При определении характеристики ползучести обязательно должна быть упругая деформация, определение которой связано с некоторыми трудностями. Поэтому экспериментально предпочтительней определять податливость при ползучести.

Характеристика ползучести $\varphi(t)$ также, как и податливость при ползучести $I_c(t)$, является возрастающей функцией времени. Между податливостью при ползучести $I_c(t)$ и характеристикой ползучести $\varphi(t)$ существует зависимость:

$$\varphi(t) = I_c(t) \cdot E_0 \quad (1.6)$$

или же

$$I_c(t) = \frac{1}{E_0} \varphi(t). \quad (1.7)$$

Кроме величин $I_c(t)$ и $\varphi(t)$ при учете ползучести иногда оперируют с модулями деформаций пенополистирола, которые учитывают ползучесть. Так, например, некоторые исследователи [34] ввели понятие о «сниженном» или «эффективном» модуле упругости пенополистирола $E(t)$, выражая его зависимостью:

$$E(t) = \frac{1}{\varepsilon_{01} + I_c(t)}, \quad (1.8)$$

где $\varepsilon_{01} = 1/E_0$ — относительная упругая деформация от напряжения 1 МПа.

Для величины $E(t)$ предложен также термин «длительный модуль». Если вместо податливости при ползучести $I_c(t)$ перейти к характеристике ползучести $\varphi(t)$, то выражение для «длительного» модуля упругости будет иметь вид

$$E(t) = \frac{E_0}{1 + \varphi(t)}. \quad (1.9)$$

Из выражений (1.8) и (1.9) следует, что модуль длительной деформации уменьшается во времени.

Для выражения полных деформаций, то есть упругих, в сумме с деформациями ползучести принимается, что линейная зависимость между деформациями и напряжениями существует как для упругих деформаций, так и для деформаций ползучести. Исходя из этого, запишем выражение для полных деформаций к моменту времени t , считая, что загрузка произошло в момент времени $t = 0$

$$\varepsilon(t) \frac{F_c}{A \cdot E_0} + \varepsilon_c(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_0 \cdot \varphi(t) = \varepsilon_0 (1 + \varphi(t)), \quad (1.10)$$

где F_c — усилие, приложенное в момент времени $t = 0$; A — площадь поперечного сечения элемента (образца); ε_0 — упругая деформация в момент приложения нагрузки ($t = 0$).

Все факторы, влияющие на значения деформаций ползучести, соответственно влияют на податливости и характеристики ползу-

чести. Следует только иметь в виду, что величины начальных напряжений не сказываются на значениях $I_c(t)$ и $\varphi(t)$, что вытекает из их определений, а также является следствием линейного характера ползучести.

Предельными податливостями и характеристиками ползучести называются их значения, соответствующие моментам затухания ползучести, когда эти деформации достигают своего предела и в дальнейшем больше не увеличиваются. Обозначают $I_c(t = \infty)$ и $\varphi(t = \infty)$.

1.2. Литературные сведения по аналитическому описанию деформируемости полимерных материалов при постоянных во времени сжимающих напряжениях

Применение полистирольного пенопласта (EPS) в строительной практике непрерывно расширяется благодаря таким свойствам, как высокая удельная прочность, малая плотность, хорошие теплоизолирующие показатели. Однако применение полистирольного пенопласта как конструкционного материала во многом зависит от того, насколько его использование соответствует задачам обеспечения жесткости и прочности ограждающей конструкции при заданных режимах эксплуатации в течение всего срока службы. Вместе с тем недостаточное отражение нашли в нормативных документах вопросы деформируемости полистирольного пенопласта под воздействием нагрузок во времени. В этой связи важнейшее значение приобретают вопросы прогнозирования длительной деформируемости (и прочности) полистирольного пенопласта при различных видах напряженного состояния, характерных для условий его эксплуатации [1–3]. Известно, что конструкция может выйти из строя как из-за достижения предельных деформаций и потери заданной формы, так и в результате разрушения. Поэтому понятно то внимание, которое уделяется изучению и прогнозированию ползучести полистирольного пенопласта при применении его в качестве конструкционного материала [4, 5].

В настоящее время процесс, связанный с явлением ползучести, развивающимся во времени, относят к реологии — науке, рассматривающей течение и деформации различных материалов в самом общем виде. Для решения задач прочности и деформируемости

ограждающих конструкций при применении в них полистирольного пенопласта необходимо иметь соотношения, связывающие напряжение, деформации и время. Испытания, соизмеримые с предполагаемым сроком службы, трудоемки, длительны и дороги. Таких данных весьма мало, и, таким образом, становятся актуальным методы прогнозирования ползучести полистирольного пенопласта, позволяющие на основе экспериментов ограниченной продолжительности [6–8] давать оценку длительной деформируемости на предполагаемое время эксплуатации конструкции.

Характерной особенностью полимерных материалов является их склонность к вязкому течению при длительном воздействии на грузки [9–11].

При разгрузке часть деформации восстанавливается вследствие упругих свойств полимера, а затем происходит процесс упругого последствия за счет постепенного исчезновения высокоэластичной деформации. Таким образом, полистирольный пенопласт проявляет под нагрузкой вязкоупругие свойства [12, 13].

1.2.1. Феноменологическое описание ползучести. Простейшие одномерные определяющие уравнения

Описание процесса ползучести может проводиться либо с привлечением механических моделей вязкоупругого тела [14–16], либо на основе феноменологических зависимостей [17, 18].

Применение механических моделей, таких как модель Максвелла, Кельвина — Фойхта, трехэлементная (с дополнительным упругим звеном), четырехэлементная модель Бюргера, многоэлементная модель [14, 15, 19] позволяют получить достаточно хорошее качественное описание процессов деформирования полимерных материалов, имеющих место при одноосном напряженном состоянии, но количественно характеристики при этом часто не совпадают с результатами опытов. Это объясняется тем, что в реальном теле нет подобного механического соединения чисто упругих и идеально вязких компонентов.

Поэтому в расчетной практике в настоящее время используют в основном уравнения состояния, основанные на феноменологическом подходе к явлению ползучести (в этом случае, например, различие в структуре металлов и полимерных материалов не играет существенной роли [15]).

В [20] ползучесть определена как пластическая деформация, происходящая при постоянной температуре и постоянном напряжении (постоянной нагрузке) в зависимости от времени. Ползучесть нельзя связывать с образованием только какого-либо одного вида деформации. В процессе ползучести могут развиваться деформации всех видов: упругие, высокоэластические, вязкие и пластические одновременно [5]. Зависимость таких деформаций (относительного удлинения или укорочения) от времени, представленная графически, называется кривой ползучести. Последняя (в зависимости от температуры и напряжения) характеризуется одной, двумя, а иногда и тремя стадиями ползучести. Во-первых, на кривой зависимости деформации от времени (рис. 1.3, *a*) существует начальный линейно-упругий участок, который не зависит от скорости нагружения (здесь не будем рассматривать случаи, когда нагрузка настолько велика, что возникают мгновенные пластические деформации). Далее на кривой ползучести можно выделить: участок с уменьшающейся скоростью ползучести, обусловленный так называемой первичной ползучестью (или первой стадией); участок с приблизительно постоянной скоростью ползучести, связанный со второй стадией или состоянием установившейся ползучести; участок с возрастающей скоростью ползучести, относящийся к третьей стадии ползучести. Эти определения становятся более прозрачными, если мы обратимся к кривой зависимости скорости деформации от времени (рис. 1.3, *b*). На первой и второй стадиях ползучести эксперимент идет при постоянном напряжении. Однако на третьей стадии увеличение скорости деформации в значительной степени обусловлено изменением площади поперечного сечения вследствие накопленных деформаций. Кроме того, разрушение материала из-за возникновения внутренних пор также может изменить эффективное поперечное сечение, воспринимающее внешнюю нагрузку. Следовательно, описание третьей стадии ползучести требует особой осторожности.

Для описания стандартных кривых ползучести предложено много упрощенных одномерных определяющих уравнений.

Рассмотрим времена, отвечающие первой и второй стадиям ползучести, и приведем соотношения, нашедшие наибольшее применение в анализе напряжений и деформаций. Первым шагом почти

во всех подходах является разделением деформаций на упругую и пластическую составляющие [7, 10, 16, 17, 19, 21]:

$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_c$ — это соотношение можно считать определением деформации ползучести.

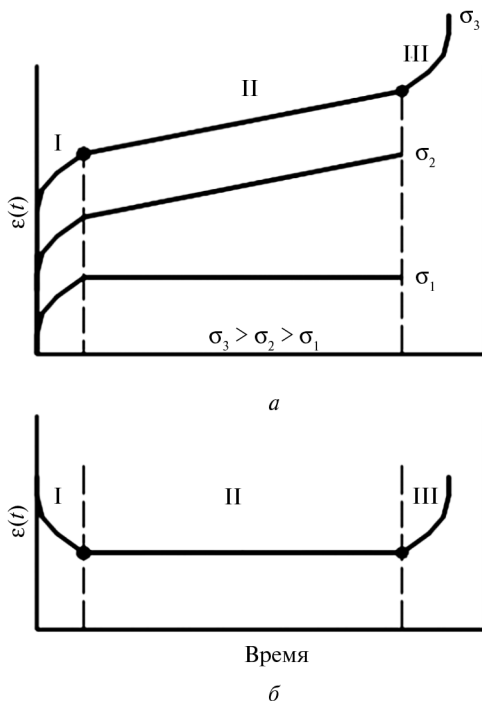


Рис. 1.3. Кривые деформаций ползучести, соответствующие разным значениям начальных сжимающих напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ (а) и скорости деформаций ползучести (б) в зависимости от продолжительности действия сжимающих напряжений

В общем случае деформация ползучести является функцией напряжения σ , времени t и температуры T [21, 22]:

$$\varepsilon_c = f(\sigma, t, T),$$

которую обычно предлагают имеющей вид произведения

$$\varepsilon_c = f_1(\sigma) \cdot f_2(t) \cdot f_3(T).$$

Широко используется на практике и достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными функциональная зависимость от напряжений в виде степенного закона Нортона [21, 23]

$$f_1(\sigma) = B \cdot \sigma^n.$$

В качестве временных зависимостей можно привести следующие соотношения:

$$f_2(t) = t \text{ — для второй стадии ползучести,}$$

$$f_2(t) = Bt^n \text{ — закон Бейли [21].}$$

Здесь все символы, не совпадающие с σ и t , обозначают материальные константы.

В соответствии с законом Аррениуса зависимость от температуры имеет вид:

$$f_2(T) = A \cdot \exp(-\Delta H / (K \cdot T)),$$

где ΔH — энергия активации; K — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Наиболее часто используется на практике зависимость $\varepsilon_c(\sigma, t, T)$, объединяющая простейшие из приведенных выше выражений:

$$\varepsilon_c = c \cdot \exp\left(-\frac{\Delta H}{KT}\right) t^m \cdot \sigma^n,$$

откуда при постоянной температуре имеем [21]

$$\varepsilon_c = Bt^m \sigma^n. \tag{1.11}$$

Приведенные формулы пригодны только для случая постоянных напряжений и представляют собой попытку математической формализации первой и второй стадий ползучести. При переменных напряжениях рассматриваются зависимости скоростного типа: например, из соотношения (1.11) вытекает при $\sigma = \text{const}$ следующая зависимость:

$$\dot{\varepsilon}_c = \frac{d\varepsilon_c}{dt} = m \cdot B \cdot t^{m-1} \cdot \sigma^n. \tag{1.12}$$

Впервые Финдли (W.N. Findley) с соавторами [10] попытались использовать для описания закономерностей ползучести многих пластмасс и полимерных композиций аналитические выражения, ранее с успехом применявшиеся для металлов. Было найдено, что временная зависимость деформаций $\varepsilon(t)$ может быть представлена формулой

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + mt^n, \quad (1.13)$$

где параметры ε_0 и m зависят от напряжения, а величина n для данного материала постоянна.

В [24] Финдли предложил более универсальную зависимость:

$$\varepsilon(t) = b_0 \cdot sh \frac{\sigma}{\sigma_0} + b_1 \left(\frac{t}{t_0} \right)^n sh \frac{\sigma}{\sigma_m}, \quad (1.14)$$

где $b_0, \sigma_0, b_1, \sigma_m$ — параметры, зависящие от температуры; $t_0 = 1$ ч.

Ниже приведены значения этих параметров для полистирола: $n = 0,5250$; $b_0 \cdot 10^3 = 48,0$; $b_1 \cdot 10^4 = 0,04$; $\sigma_0 = 145$ (МПа); $\sigma_m = 4,7$ (МПа).

Формула (1.14) охватывает линейную и нелинейную области. В частности, за границу линейности рекомендуется [25] принимать напряжение $\sigma_L = 0,77\sigma_m$.

Особенность рассмотренных формул заключается в том, что их компоненты состоят из произведения явных функций напряжения и времени.

Формулы типа уравнения Финдли применимы на практике*, поскольку они позволяют рассчитать деформации ползучести в условиях действия постоянного напряжения, если известны константы ε_0 , m и n . Следует отметить, что уравнение (1.13) и его соотношения использованы в работах [19, 23, 26, 27] для обработки экспериментальных данных, а аналитический анализ формул типа уравнения Финдли широко представлен в [28].

П.В. Мелентьевым [29] предложена зависимость, полученная на основе обработки около 300 кривых ползучести термопластов,

* Уравнение типа (1.13) применено в EN 1606+AC в качестве расчетного метода при обработке экспериментальных значений деформаций ползучести при сжатии строительных теплоизоляционных материалов.

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru