

УДК 539.21:624.121.54

**ПОСТРОЕНИЕ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ (РЕОЛОГИЧЕСКИХ)
И ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

М.М. Лордкипанидзе, Н.Г. Дондоладзе

Союз науки и энергетики Грузии

Проведено исследование несущей способности некоторых материалов. Показано, что после их нагружения наряду с упругой деформацией постепенно развивается замедленная ползучесть, затухающая во времени. Эта ползучесть обусловлена исключительно действием поверхностно-активных сред и носит обратимый характер, заключающийся в полном исчезновении дополнительной деформации при удалении поверхностно-активной среды. Исследования материалов разного состава и структуры позволяют сделать предположение о возможных механизмах процесса образования и роста микротрещин, обеспечивающих деформацию обратимой ползучести. При феноменологическом описании затухающей ползучести бетона в обычной тепловлажностной атмосфере использовались те или иные реологические модели, главным элементом служило "тело Кельвина", представляющее собой параллельное соединение упругого и вязкого элементов.

Ключевые слова: ползучесть, твердое тело, феноменологическая модель, поверхностно-активная среда.

Введение. При исследовании несущей способности некоторых материалов было обнаружено, что после их нагружения наряду с упругой деформацией постепенно развивается замедленная ползучесть, затухающая во времени. Особенно подробно это явление было изучено на бетоне, деформируемом в обычных тепловлажностных условиях [1,2]. Согласно проведенным совместно с В.К. Балавадзе экспериментам [3-5], эта ползучесть обусловлена исключительно действием поверхностно-активных сред и носит обратимый характер, заключающийся в полном исчезновении дополнительной деформации при удалении поверхностно-активной среды. Исследования материалов разного состава и структуры показали, что такая обратимая ползучесть носит самый общий характер и может рассматриваться как новая форма проявления эффекта Ребиндера [6-8].

При феноменологическом описании затухающей ползучести бетона в обычной тепловлажностной атмосфере использовались те или иные реологические модели [9, 10]. В работе [10] главным элементом служило "тело Кельвина", представляющее собой параллельное соединение упругого и вязкого элементов. Однако аппроксимация наших исследований обратимой ползучести разнообразных материалов в различных поверхностно-активных средах с

помощью компьютерной программы Scientific Work Plase показала, что для большинства материалов наилучшие результаты (коэффициент корреляции >0,99) дает использование формулы Вейбулла-Кольрауша в виде двучленного разложения с двумя периодами релаксации:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \left[1 - P_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) - (1 - P_1) \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right], \quad (1)$$

где ε – текущая, а ε_{\max} – максимальная деформации; t – текущее время; τ_1 и τ_2 – периоды релаксации; P_1 – доля процесса, описываемая первым периодом релаксации.

Результаты расчета параметров испытания различных материалов даны в таблице.

Таблица

Параметры обратимой ползучести различных материалов в поверхностно-активных средах (ε_{el} – мгновенная упругая деформация, остальные параметры даны в формуле (1))

№	Материал	Размер образцов, мм	Среда	Вид напряженного состояния	ε_{el} , %	ε_{\max} , %	τ_1, c	τ_2, c	P_1
1	Бетон	50x50x250	Вода	Растяжение	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^6$	-	-
2	Бетон	40x40x160	Вода	Сжатие	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$8,6 \cdot 10^6$	-	-
3	Бетон	50x50x250	Влажн. воздух	Растяжение	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^5$	-	-
4	Туф	50x50x250	Вода	Растяжение	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^5$	0,85
5	Туф	40x40x160	Вода	Сжатие	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^6$	0,68
6	Гипс	40x40x160	Вода	Растяжение	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^4$	36,6	0,64
7	Гипс	40x40x160	Вода	Сжатие	$8 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^2$	0,73
8	Сталь-3	3x2x72	Водород	то же	$6,0 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^2$	$2,1 \cdot 10^2$	0,56
9	Стекло	1x8x120	Вода	"-"	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^2$	0,93
10	ПММА	4x8x80	Бензин	"-"	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^3$	-	-
11	Резина	0,5x10x160	Бензин	"-""-"	33	30	$5,2 \cdot 10^2$	$4,0 \cdot 10^2$	0,13
12	Нафталин	3x3x35	Бензол	-	-	-	72 *	-	-

* - обратный ход при испарении бензола

Дополнительная информация, полученная при компьютерной обработке экспериментальных данных, позволила определить максимальную деформацию обратимой ползучести и время ее завершения по начальному участку кривой ползучести (т.е. не дожидаясь окончания процесса, подчас очень длительного), а также выявить особенности процесса, связанные с различной структурой и характером нагружения испытываемого материала. Это оказалось существенным для построения физической модели процесса.

Результаты исследования. Для объяснения результатов исследований обратимой ползучести материалов в поверхностно-активных средах рассмотрим следующие реологические и физические модели процесса. Основные исходные данные для построения моделей:

1. При нагружении образца в отсутствие поверхностно-активной среды напряжением 0,5...0,8 предела прочности мгновенно происходит истинно упругая, полностью обратимая и не развивающаяся во времени деформация, а бетон лишь при первом нагружении – разгрузке проявляет остаточную деформацию.

2. После введения поверхностно-активной среды начинает развиваться ползучесть, затухающая во времени и полностью обратимая при удалении среды.

3. Кинетика развития деформации обратимой ползучести в нулевом приближении описывается экспоненциальной функцией с показателем экспоненты, равным отношению текущего времени проведения опыта к некому характеристическому временному параметру – “периоду релаксации”; в некоторых случаях в начале процесса ползучесть развивается несколько быстрее, что может быть с большей точностью описано суммой двух экспонент, вторая из которых имеет меньший период релаксации.

4. Кинетика возврата деформации обратимой ползучести при удалении поверхностно-активной среды также близка к экспоненциальной и зависит от интенсивности удаления среды (естественная сушка, вакуумирование).

5. При больших нагрузках, приближающихся к пределу прочности, наряду с обратимой наблюдается также необратимая ползучесть, не исчезающая при удалении среды. Она оказывается тем больше, чем выше напряжение.

При построении физической модели процесса, исходя из приведенных результатов, можно считать, что вся накапливаемая деформация обратимой ползучести обеспечивается образованием и развитием докритических (по Гриффитсу) зародышевых трещин, к которым могут быть применены представления термодинамической теории зародышеобразования. Согласно обеим указанным теориям, при напряжениях (избытке свободной энергии) меньших, чем те, которые приводят к лавинному росту трещины (новой фазы), происходит флюктуационное образование и самопроизвольное захлопывание докритических зародышевых трещин (зародышей новой фазы). Однако если на стенках трещины происходит адсорбция вещества, поверхностно-активного к данному материалу, то обратное схлопывание трещины затрудняется, и она стабилизируется при некоторых размерах меньше критического и постепенно растет. Скорость роста такой докритической трещины может определяться скоростью поступления поверхностно-активного вещества в вершину трещины (вязким течением, поверхностной диффузией по стенкам трещины или кнудсеновским режимом распространения газа по трещине), либо кинетикой термофлюктуационного разрыва связей в ее вершине, как это, например, имеет место в гидrolитическом разрыве силоксановых связей при совместном действии воды и приложенного напряжения.

Примем, что вся деформация ползучести обеспечивается образованием и раскрытием микротрещин, равномерно распределенных по всему объему материала, находящемуся под нагрузкой. По-видимому, так происходит у

макроскопически однородных силикатного и органического стекол. В поликристаллах (туф, гипс, сталь) микротрещины скорее всего образуются на границах зерен; на это указывает то обстоятельство, что поликристаллы в поверхностно-активной среде разрушаются главным образом по границам зерен. Ползучесть резины обусловлена ее набуханием, активированным приложенным напряжением.

Заключение. Сопоставление экспериментальных данных обратимой ползучести разных материалов в разных средах позволяет сделать предположение о возможных механизмах процесса образования и роста микротрещин, обеспечивающих деформацию обратимой ползучести. Анализ компьютерной обработки результатов эксперимента показал следующее:

1. Ползучесть бетона - водонасыщенного либо находящегося во влажной атмосфере, описывается уравнением с одним периодом релаксации.

2. Ползучесть увлажненных туфа, гипса, стекла и стали хорошо аппроксимируется уравнением с двумя периодами релаксации. Для туфа и стекла второй (по времени действия – первый) период релаксации короткий, и его доля в общей деформации мала. Для резины второй период релаксации также мал, но определяет почти весь деформационный процесс. Для гипса и стали второй период релаксации мал, но доля действия обоих периодов релаксации соизмерима.

Литература

1. **Цицосани З.Н.** Усадка и ползучесть бетона – Тбилиси: Мецниереба, 1979.– 390 с.
2. **Шейкин А.Е., Федоров А.Е.** Собственные напряжения в цементном камне и их влияние на некоторые технические свойства бетона // В сб.: Специальные цементы и бетоны. - М.: МИИТ, 1971.– С. 64-75.
3. **Балавадзе В.К.** Новое о прочности и деформативности бетона и железобетона. – Тбилиси: Мецниереба, 1986.– 362 с.
4. **Лордкипанидзе М.М.** Прочностные и деформативные характеристики бетона с позиций адсорбционной теории о природе его ползучести // Бетон и железобетон. – 1992. – №12. – С. 85-87.
5. **Лордкипанидзе М.М.** Замедленная обратимая деформация бетона и твердых тел в поверхностно-активных средах - новая форма эффекта Ребиндера // Грузинский технический университет. – Тбилиси, 2009.– С. 31-36.
6. **Ребиндер П.А.** Избранные труды. Физико-химическая механика. – М.: Наука, 1979. – 386 с.
7. **Лордкипанидзе М.** Явление замедленной обратимой деформации твердых тел в поверхностно-активных средах. Ч.2: Сталь-3 в газообразном водороде // Коллоидный журнал. – 2006. – №2. – С. 47-52.
8. **Перцов Н.В., Лордкипанидзе М.М., Джоджуа Т.А.** Модели и механизмы обратимой ползучести твердых тел в поверхностно-активных средах // Сб. трудов Международной научной школы "Вибротехнология-2002" по механической обработке дисперсных материалов и сред. – Одесса, 2002. - С. 36-38.

9. **Тамразян А.Г.**// Бетон и железобетон. - 1998. - №2. – С. 71-72.
10. **Лордкипанидзе М.М.** О создании новой феноменологической теории обратимой ползучести твердых тел // Межд. симп. "Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений". – Тбилиси, 2000. – 63 с.

*Поступила в редакцию 05.04.2016.
Принята к опубликованию 05.12.2016.*

ՊԻՆԴ ՄԱՐՄԻՆՆԵՐԻ ՍՈՂՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ԵՐԵՎՈՒԹԱԲԱՆԱԿԱՆ ԵՎ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼՆԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՈՒՄԸ

Մ.Մ. Լորդկիպանիձե, Ն.Գ. Դոնդոլաձե

Հետազոտվել են որոշ նյութերի կրող հատկությունները: Ցույց է տրվել, որ դրանց բեռնումից հետո առաձգական դեֆորմացման հետ մեկտեղ աստիճանաբար զարգանում է ժամանակի ընթացքում դանդաղող-մարող սողունություն: Այդ սողունությունը բացառապես պայմանավորված է մակերեսային ակտիվ միջավայրերի ազդեցությամբ և ունի շրջելի բնույթ՝ մակերեսային ակտիվ միջավայրի հեռացման դեպքում լրացուցիչ դեֆորմացման ամբողջական անհետացմամբ: Տարբեր կազմերով և կառուցվածքներով նյութերի հետազոտությունները թույլ են տվել ենթադրել, որ այդպիսի շրջելի սողունությունը միկրոճաքերի ձևավորման և աճի ընթացքում հնարավոր մեխանիզմների գոյության արդյունք է: Սովորական ջերմախոնավ մթնոլորտային պայմաններում բետոնի մարող սողունության երևութաբանական նկարագրության համար օգտագործվել են հոսքաբանական տարբեր մոդելներ: Որպես գլխավոր տարր ծառայել է «Կելվինի մարմինը», որը առաձգական և մաճուցիկ տարրերի զուգահեռ միացություն է:

Առանցքային բառեր. սողունություն, պինդմարմին, երևութաբանական մոդել, մակերեսային ակտիվ միջավայր:

CONSTRUCTION OF PHENOMENOLOGICAL (RHEOLOGICAL) AND PHYSICAL MODELS OF THE RIGID BODY CREEP

M.M. Lordkipanidze, N.G. Dondoladze

The carrying capacity of some materials is investigated. It is shown that after their loading, along with elastic deformation, a slow creep that damps in time gradually develops in them. This creep is induced exclusively by the action of surface-active media and is of reversible nature because additional deformation completely vanishes when the surface-active medium is removed. Studies of materials of various composition and structure allow to make an assumption about the mechanisms of the processes of formation and growth of microcracks, ensuring the deformation of reversible creep. In the phenomenological description of the damping creep of concrete in the usual thermo-humid environment, various rheological models have been used, where the so-called Kelvin body, which is a parallel combination of elastic and viscous elements, serving as the main element.

Keywords: creep, rigid body, phenomenological model, surface-active medium.