

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАТИМОЙ ЗАТУХАЮЩЕЙ ПОЛЗУЧЕСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОСТОЯННОМ И МНОГОКРАТНОМ НАГРУЖЕНИИ

М.ЛОРДКИПАНИДЗЕ, Л.МИНКИН, Н.ЧАХВАШВИЛИ, Н.БОЧОРИШВИЛИ

Работа выполнена при финансовой поддержке национального научного фонда им. Шота Руставели

Поступило 12.10.2017

### Аннотация

*Результаты, полученные на разнообразных материалах (бетон, туф, гипс, силикатное стекло, оргстекло, резина, монокристалл нафталина) в жидких поверхностно-активных средах, были аналогичными и показывали, что предельная деформация обратимой ползучести достигается при циклическом нагружении во много раз быстрее, чем при постоянной нагрузке. Исключение составляет только сталь в среде газообразного водорода. Это наводит на мысль, что именно фазовое состояние поверхностно-активной среды играет первостепенную роль. Природу такого ускоренного развития докритических трещин при действии жидкой поверхностно-активной среды можно представить следующим образом. При растяжении образца в среде под постоянным растягивающим напряжением образуются докритические (по Гриффитсу) трещины-микрощели, развитие которых обеспечивается совместным действием механического напряжения и поверхностно-активной среды, с одной стороны, облегчающей разрыв связей в твердом теле, а с другой – обуславливающей стабилизацию зародышевых трещин, которые согласно термодинамике должны были бы сомкнуться. Кинетика роста таких микротрещин определяется скоростью поступления поверхностно-активной среды в вершину трещины по тонким каналам.*

*Следует подчеркнуть еще одну важную особенность явления обратимой ползучести твердых тел в поверхностно-активных средах - это полная обратимость явления независимо от числа циклов помещения образца в активную среду и ее последующее удаление, свойства образца остаются постоянными: при отсутствии среды величина упругой деформации не изменяется, в присутствии среды параметры обратимой ползучести также остаются постоянными. Это говорит об обратимости процессов образования докритических трещин как в термодинамическом, так и в механическом смысле.*

*Явление обратимой ползучести твердых тел при действии поверхностно-активных сред служит уникальным инструментом исследования образования и развития докритических трещин в напряженных материалах.*

*Дальнейшее исследование этого явления может помочь пониманию природы и механизма внезапных катастрофических разрушений напряженных конструкций.*

**Ключевые слова:** разрыв связи, ползучесть, дислокационная модель, загрузка, микротрещина, эффект Ребиндера

При изучении обратимой затухающей ползучести бетона и других материалов в поверхностно-активных средах выяснилось, что при циклическом нагружении-разгрузке в поверхностно-активной среде на большинстве материалов наблюдается большое ускорение ползучести [1,2]. Этот режим может быть реализован двумя способами: а) при постоянной нагрузке путем подвешивания к образцу груза до достижения максимальной деформации обратимой ползучести; б)

на разрывной машине (при растяжении) или механическом прессе (при сжатии) образец при небольшой скорости нагружения доводится до заданного напряженного состояния, затем также медленно разгружается; такие циклы повторяются несколько раз, пока процесс нагружения-разгрузки не будет давать прироста деформации. Схематически эти два вида испытаний представлены на рис. 1.

При длительном нахождении образца без нагрузки, накопившаяся деформация ползучести исчезает (на рисунке показано стрелкой) в результате проявления упругого последействия [3,4].

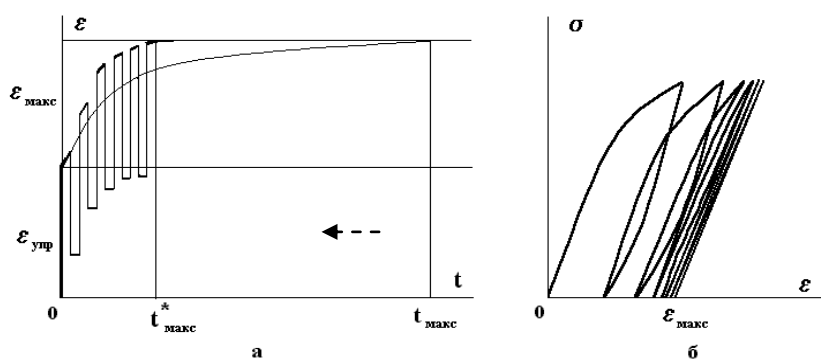


Рис. 1.

График обратимой ползучести твердых материалов в поверхностно-активных средах при действии нагрузки (а); тонкая линия деформации – при действии постоянной нагрузки; прерывистая толстая линия – при испытаниях в режиме нагружение-разгружение;

$t_{\text{макс}}$  – время достижения максимальной деформации обратимой ползучести при действии постоянной нагрузки;  $t_{\text{макс}}^*$  – то же, при действии циклической нагрузки; график развития деформации твердых материалов в поверхностно-активных средах при повторных циклических испытаниях с постоянной скоростью нагружения (б);

$\varepsilon_{\text{макс}}$  – максимальная остаточная деформация при циклическом нагружении с постоянной скоростью

Результаты, полученные на разнообразных материалах в жидких поверхностно-активных средах, были аналогичными и показывали, что предельная деформация обратимой ползучести достигается при циклическом нагружении во много раз быстрее, чем при постоянной нагрузке. Исключение составляет только сталь в среде газообразного водорода. Это наводит на мысль, что именно фазовое состояние поверхностно-активной среды играет первостепенную роль. Природу такого ускоренного развития докритических трещин при действии жидкой поверхностно-активной среды можно представить следующим образом. При растяжении образца в среде под постоянным растягивающим напряжением образуются докритические (по Гриффитсу) трещины-микрощели, развитие которых обеспечивается совместным действием механического напряжения и поверхностно-активной среды, с одной стороны, облегчающей разрыв связей в твердом теле, а с другой – обуславливающей стабилизацию зародышевых трещин, которые согласно термодинамике должны

были бы сомкнуться. Кинетика роста таких микротрещин определяется скоростью поступления поверхностно-активной среды в вершину трещины по тонким каналам.

В качестве конкретной модели нами предложена простейшая дислокационная схема, представленная на рис. 2. Источник дислокаций Франка-Рида  $S$  под действием напряжения генерирует дислокации в плоскость скольжения, которые встречают на своем пути препятствие в виде границы зерна  $G$  и накапливаются перед ним. Передние дислокации сливаются, образуя совместное ядро  $D$ , представляющее собой выходящую на поверхность дислокационную трубку, служащую транспортным путем для движения поверхностно-активного вещества. Под действием напряжения при невозможности дислокациям преодолеть барьер, созданный границей зерна, в соседнем зерне по Мотту возникает микротрещина  $C$  [5,6].

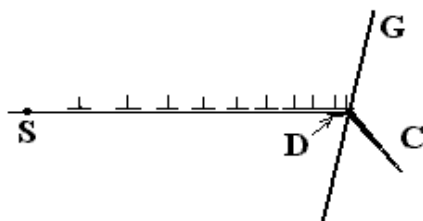


Рис. 2. Дислокационная схема модели

В какой-то момент снимается внешнее напряжение. Дислокации возвращаются в источник, дислокационное мультиядро по крайней мере частично смыкается, и поверхностно-активная жидкость оказывается запертой в трещине. Внешнее напряжение, имевшее один компонент тензора напряжения, превращается в гидростатическое давление жидкости той же величины. Однако это давление – шаровой тензор, имеющий три компонента напряжений. Поэтому к растягивающим добавляются и сдвиговые напряжения. По механизму гидроразрыва это приводит к ускоренному развитию трещины. Поэтому снятие нагрузки не только не приостанавливает распространение трещины, но, напротив, приводит к ее более быстрому развитию. Естественно, когда поверхностно-активной средой является газ, такого ускорения развития трещин при циклическом разгрузении-нагрузении не возникает, что и наблюдается в опытах на стали в атмосфере газообразного водорода, а также резины в бензине, где обратимая ползучесть связана с набуханием резины в бензине, активированная приложенным растягивающим напряжением [7].

Следует подчеркнуть еще одну важную особенность явления обратимой ползучести твердых тел в поверхностно-активных средах - это полная обратимость явления независимо от числа циклов помещения образца в активную среду и ее последующее удаление, свойства образца остаются постоянными: при отсутствии среды величина упругой деформации не изменяется, в присутствии среды параметры обратимой ползучести также остаются постоянными. Это говорит об обратимости процессов образования докритических трещин как в термодина-

мическом, так и в механическом смыслах. Подобно классическим опытам И.В.Обреимова [8] с расщеплением слюды в вакууме, когда было установлено, что трещина обратимо смыкается, и для ее повторного образования требуется такое же усилие, зародышевые трещины в опытах по обратимой ползучести также полностью смыкаются при удалении поверхностно-активной среды.

Тем не менее, возникает вопрос – почему все-таки происходит преждевременное разрушение механически напряженных конструкций (автоклавов, газовых труб и др.), когда действующее напряжение заведомо меньше критического, приводящего к необратимому развитию трещин? Ведь согласно закону термодинамики количество образовавшихся трещин не должно превышать их число, соответствующее данной плотности упругого напряжения. Очевидно этот закон не предусматривает их объединение, коалесценцию. Пользуясь простейшей дислокационной схемой, можно представить, что дислокация, движущаяся в плоскости скольжения, в которой лежит трещина, вливается в нее и затем выходит с противоположной стороны. Это в определенных условиях эквивалентно перемещению трещины на одно межатомное расстояние. Можно также предположить, что такие зародышевые трещины движутся в неоднородном поле напряжения. Так или иначе, они, смыкаясь, могут образовать ту единственную критическую трещину, которая послужит зародышем хрупкого разрушения материала в той поверхностно-активной среде, в которой эксплуатируется данная конструкция.

Исследование природы, закономерностей и механизма явления обратимой ползучести твердых тел, находящихся в поверхностно-активных средах, позволяет высказать следующие соображения:

1. Обнаруженное явление является одной из форм проявления эффекта Ребиндера, обусловленное облегчением развития микротрещин в результате снижения поверхностной энергии вследствие контакта с поверхностно-активной средой.

2. Термодинамическое описание явления основывается на схеме развития трещины по Гриффитсу с учетом снижения поверхностной энергии твердого тела в результате контакта с поверхностно-активной средой, а также на представлениях о зародышеобразовании в метастабильных условиях.

3. Феноменологическое описание собственно обратимой ползучести наиболее точно производится комбинацией из двух элементов Кельвина; при больших нагрузках, когда возникает некоторая доля необратимой деформации, к ним следует добавить комбинацию из параллельно соединенных элементов Гука и Сен-Венана.

4. Молекулярный механизм проявления эффекта Ребиндера, в частности при развитии явления обратимой ползучести, можно объяснить следующим. Ранее считалось равноправным рассмотрение действия поверхностно-активного вещества как частицы, вступающей во взаимодействие с напряженными атомами в вершине трещины и ослабляющей их притяжение друг к другу, т.е. облегчающей разрыв связи, либо как частицы, которая под действием двумерного давления «расклинивает» трещину, также облегчая ее развитие. В последнее время

предпочтение отдается первому механизму, поскольку установлено, что такая физическая модель позволяет производить расчеты методом молекулярной динамики. Такие расчеты были проведены Е.Д.Щукиным и В.С.Ющенко для плоской двумерной модели и действительно показали ослабление и облегчение разрыва связи в виртуальном твердом теле в присутствии поверхностно-активного атома [9]. Для «расклинивания» трещины такую модель создать не представляется возможным, поскольку очень трудно моделировать геометрию микротрещины и распределение сил между атомами твердого тела и поверхностно-активной частицей. В пользу первого механизма также говорит случай гидролитического расщепления стекла и других силикатсодержащих материалов, когда твердо установлено, что облегчение разрыва связи Si-O обусловлено одновременным разрывом связи Н-О в молекуле воды и перестройкой связей с образованием группы Si-OH на образовавшейся поверхности трещины разрушения [10].

5. Явление обратимой ползучести твердых тел при действии поверхностно-активных сред служит уникальным инструментом исследования образования и развития докритических трещин в напряженных материалах.

6. Дальнейшее исследование этого явления может помочь пониманию природы и механизма внезапных катастрофических разрушений напряженных конструкций.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Балавадзе В.К., Лордкипанидзе М.М. Исследование природы затухающей ползучести бетона при осевом сжатии//Сообщения АН ГССР. 1981.Т.103. №1.
2. Балавадзе В.К., Лордкипанидзе М.М. Сообщения АН Груз.ССР. 1979. Т.93. №1.
3. Ребиндер П.А., Логгинов Г.И. Изменение упругих свойств слюды при проникновении жидкости в деформируемый кристалл//ДАН СССР. Новая серия. 1941. Т.30. №6.
4. Ребиндер П.А., Логгинов Г.И. Изменение упругих свойств слюды при проникновении жидкости в деформируемый кристалл//ДАН СССР. Новая серия. 1941. Т.30. №6.
5. Ван Бюрен. Дефекты в кристаллах. М.:изд-во иностр. лит-ры. 1962.
6. Коттрелл А.Х./В кн.:Атомный механизм разрушения. М.:Металлургиздат. 1962.
7. Лордкипанидзе М.М. Обратимая ползучесть органических материалов//Энергия. №4(24). 2002. Тбилиси.
8. Obreimow I. Proc. Roy.Soc. A 1930. V.127.
9. Щукин Е.Д., Ющенко В.С. Физ-хим. мех. мат. 1966. Т.2.
10. Берштейн В.А., Никитин В.В., Степанов А.В., Шамрей Л.//Физика твердого тела. 1973. Т.15. №11.

МЕРАБ ЛОРДКИПАНИДЗЕ, Доктор техн.наук, профессор  
(+995 32) 2180951; Mob.: 558776559  
E-mail: tami@dsl.ge; lordkipanidzemerab@yahoo.com