

А.В.МИХАЛЮК
«Геотехнология», Киев, Украина

РЕЛАКСАЦИЯ В ГРУНТАХ И ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Физической основой большинства известных методов управления взрывом является зависимость механического поведения горных пород (деформирования, разрушения) от временных характеристик режима нагружения. Однако, используя эту зависимость, мы, как правило, не принимаем во внимание ее релаксационную природу, свойственную всему классу геофизических сред, активно влияющую на изменение их физического состояния, определяющую рассеивание энергии силового воздействия и, как следствие, влияющую на его результат. Поэтому изучению релаксационных свойств горных пород было уделено повышенное внимание.

Релаксационный характер динамического деформационного процесса виден на осциллограммах его регистрации в виде фазовых сдвигов между напряжениями и деформациями, эффекта последействия и т.п.[3].

Фазовый сдвиг между напряжениями и деформациями в горной породе Δt зависит как от их деформационной податливости (жесткости, прочности), так и от неравномерности нагружения. На рис.1 приведена зависимость фазового сдвига от неравномерности нагрузки, характеризуемой отношением наименьшего главного напряжения к наибольшему $\zeta = \sigma_3/\sigma_1$, для двух групп пород с примерно одинаковыми свойствами: прочных, с прочностью на одноосное сжатие $\sigma_0 > 75$ МПа (известняков, доломитов, сланцев, песчаников, алевролитов, аргиллитов, гранитов (кривая 2)), и слабых, $\sigma_0 \leq 30$ МПа (каменный уголь, известняк-ракушечник и т.п. (кривая 1)). Видны две особенности анализируемой зависимости, имеющие большое значение при выяснении механизмов релаксационных процессов в горных породах:

- фазовый сдвиг деформаций возрастает с увеличением неравномерности нагружения;
- в средах с большей деформационной податливостью (способных к более интенсивным структурным изменениям в процессе деформирования) фазовый сдвиг деформаций значительно (в 2,5-4 раза) больше, чем в прочных, жестких породах с преимущественно упругим развитием деформационного процесса.

Из этих зависимостей следует, что с приближением напряженного состояния к всестороннему равномерному сжатию фазовый сдвиг деформаций в прочных породах практически исчезает; в слабых породах при $\zeta = 1$ значение Δt заметно отличается от нуля.

Фазовые сдвиги между различными компонентами тензоров напряжений и деформаций различны. Наибольшим является отставание $\varepsilon_1(t)$ от $\sigma_1(t)$, т.е. по направлению действия максимального главного напряжения. В грунтах и горных породах оно может изменяться от 0,15-0,2 до 3-3,5 мс. Фазовый сдвиг поперечных деформаций значительно меньше: по отношению к σ_1^m он не превышает 1-2 мс,

а относительно $\sigma_2^m - 0,0,1$ мс. Таким образом, горным породам свойственна анизотропия релаксационных процессов: по направлениям действия σ_2 и σ_3 релаксационные процессы протекают быстрее, чем по направлению σ_1 , несмотря на то, что абсолютная величина деформаций ε_2 и ε_3 при достаточно высокой неравномерности напряженного состояния может быть сравнимой и даже превышать деформацию ε_1 вследствие дилатансионных явлений. Наиболее ярко это проявляется при одноосном динамическом нагружении горных пород. Заметим, что анизотропия релаксационных процессов не связана с генетической анизотропией свойств пород и наблюдается в средах, которые можно считать изотропными (массивный однородный песчаник, каменная соль, гранит и др.).

В большинстве экспериментов фазовые сдвиги между отдельными компонентами тензора напряжений не отмечены, однако в некоторых случаях слабое отставание σ_2 от σ_1 (по амплитудам) имеет место. В карбонатных породах оно может достигать 50 мкс; в песчаниках и алевролитах – 88 мкс; в каменной соли – 400 мкс; в полиметилметакрилате – 13 мкс; в литой слюде – 148 мкс; в металлах – 6 мкс. В среднем в экспериментах временное смещение между σ_1 и σ_2 в разных средах варьируется от 1,4 до 26 мкс. В каменной соли оно достигает 92,2 мкс.

Замедление релаксационных процессов в горных породах с увеличением неравномерности их напряженного состояния позволяет сделать вывод о том, что релаксация в таких средах связана не только с проявлением вязкости [1], но и со структурными изменениями, вызванными деформированием. Поскольку неравномерность нагружения способствует возникновению и развитию в деформируемой среде структурных несовершенств (например, вызванных дилатансией [4]), можно предположить, что указанное замедление релаксационных процессов

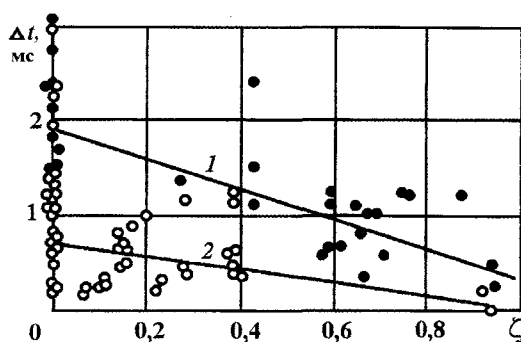


Рис.1

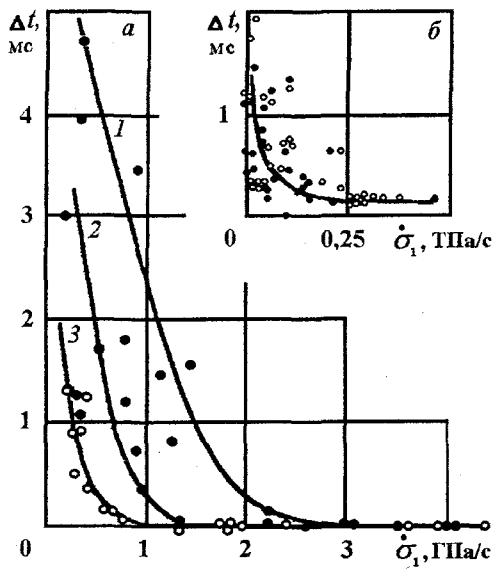


Рис.2

связано с увеличением микро- и макротрещиноватости вследствие меж- или внутрикристаллического скольжения [2].

В грунтах, являющихся трехфазными системами, в которых каждая фаза играет существенную роль в развитии деформационного процесса, отставание деформаций сильно зависит от их фазового состава и режима нагружения. На рис.2, а показана зависимость величины Δt от скорости нагружения $\dot{\sigma}_1$. Кривая 3 построена по результатам опытов с грунтами, имеющими влажность 13-15 %, кривая 1 – для суглинков (влажность 9,6 %), кривая 2 – для глины (влажность 23,5 %). Из рис. 2 следует, что наибольших значений фазовый сдвиг деформаций достигает при динамических нагружениях с малой скоростью нарастания давления (во всех экспериментах обращалось внимание на недопустимость дренажа поровой влаги, т.е. влагосодержание грунта сохранялось). Увеличение скорости нагружения приводит к быст-

рому уменьшению запаздывания деформаций, и при некоторых конечных значениях $\dot{\sigma}_1$ фазовый сдвиг деформаций практически исчезает.

Аналогичная зависимость $\Delta t(\dot{\sigma}_1)$ характерна и для скальных горных пород (рис.2, б). Несмотря на значительный разброс экспериментальных данных, для большинства горных пород эта зависимость справедлива для скоростей нагружения до 200 ГПа/с, т.е. на 2 порядка больших, чем для грунтов.

На рис.3 представлена зависимость фазового сдвига деформаций в желто-зеленых глинах от их влажности (кривая 2). Поведение кривой подтверждает сделанные выше замечания. Первый минимум фазового сдвига наблюдается при влажности глин в диапазоне 10-15 %, что соответствует количеству влаги, определяемому насыщением адсорбционных пленок минеральных зерен [1]. Уменьшение влажности грунта сопровождается возрастанием фазового сдвига. Аналогичное явление наблюдается и при $w > 15$ %, однако в этой области увеличение Δt продолжается до тех пор, пока влажность грунта не достигнет 25 %, после чего Δt быстро уменьшается. Характер кривой позволяет сделать вывод, что при динамическом нагружении в грунте должно существовать, по крайней мере, три механизма релаксации – структурный, вязкостный и миграционный (фильтрационный). Роль того или иного механизма зависит от фазового состава грунта. В грунтах с малой влажностью и большой свободной пористостью основная роль в развитии процессов принадлежит структурному механизму (как в скальных породах). В грунтах с влажностью, достаточной, чтобы играть роль эффективной межзерновой «смазки», но недостаточной для появления свободной жидкости, способной мигрировать под влиянием контактных градиентов давлений, и такой, которая превращает грунт в «грунтовую массу» (водно-минеральную смесь, не сопротивляющуюся сдвигу), преобладает вязкостный механизм релаксации, при котором скорость релаксационных процессов максимальна. Если фазовый состав грунта таков, что наряду со свободной влагой имеется и свободная пористость, то на скорость релаксационных процессов влияет миграция (перетоки) свободной, несвязанной жидкости.

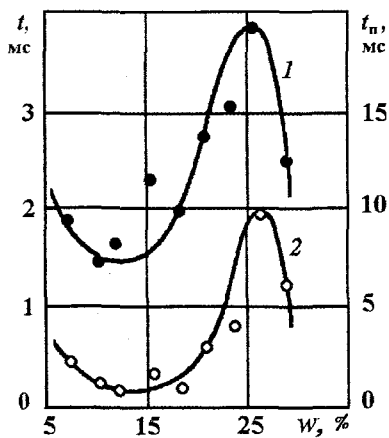


Рис.3

Ярким проявлением релаксационных процессов в грунтах и горных породах является так называемое динамическое последствие. Этот процесс может продол-

жаться достаточно долго: в глинистых грунтах и мерзлоте – до 18 мс; в песчаниках – до 11 мс; известняках – до 20 мс; ангидритах – до 16,3 мс; алевролитах – до 17 мс; каменной соли – до 12,5 мс. Однако в большинстве случаев в скальных породах динамическое последствие значительно меньше, чем в грунтах, и не превышает 5 мс. Как показывают результаты экспериментов, период динамического последствия t_n практически не зависит от неравномерности напряженного состояния в среде, что не противоречит физической природе описываемого эффекта. Отметим, что динамическое последствие (как и фазовый сдвиг деформаций) существенно по направлению действия наибольшего главного напряжения σ_1 (с которым связано большинство зарождающихся дефектов структуры) и практически отсутствует по направлению действия наименьшего главного напряжения.

В грунтах продолжительность упругой разгрузки по деформациям после полной разгрузки по напряжениям зависит от фазового состава грунта, причем эта зависимость аналогична рассмотренной выше зависимости $\Delta t(w)$ (рис.3, кривая 1). При малой влажности грунта упругая разгрузка замедляется за счет преодоления сил трения в процессе межзернового скольжения; при влажности $w_a < w < w_n$ (w_a – влажность, соответствующая насыщению адсорбционных пленок частиц грунта; w_n – влажность, соответствующая полному влагонасыщению грунта) на упругую разгрузку оказывает влияние движение грунтовой влаги при расширении защемленного и сжатого газа (воздуха).

Фазовый сдвиг деформаций и последствие отражаются на диаграммах динамического деформирования грунтов и горных пород, имеющих гистерезисный вид. Его связь с релаксационными процессами очевидна. При быстрых динамических процессах в релаксирующих средах равновесная деформация не успевает развиться за время нагружения, поэтому на этапе нарастания давления диаграмма деформирования смещается в сторону уменьшения деформаций (к оси напряжений). Это смещение тем больше, чем выше скорость нагружения (деформирования) и чем медленнее протекают релаксационные процессы в среде. При динамической разгрузке деформации также отстают от равновесных значений (из-за задержки обратимой составляющей), однако в этом случае равновесная деформация должна быть меньше регистрируемой, т.е. диаграмма $\sigma(\epsilon)$ смещается в сторону увеличения деформаций (от оси напряжений). С уменьшением динамичности деформационного процесса эффекты запаздывания вырождаются; ветви нагружения и разгрузки сближаются и при статическом деформировании совпадают (если уровень нагружения не вызывает появления пластических деформаций).

Как следует из экспериментов, увеличение ϵ_1 в скальных породах может продолжаться при уменьшении σ_1 до 42 % в песчаниках, 40 % в гранитах, 38 % в алевролитах, 49 % в известняках, 55 % в доломитах, 60 % в каменной соли, 68 % в известняке-ракушечнике, 22 % в бетоне, 47 % в полиметилметакрилате. При отсутствии фазового сдвига деформаций разгрузка по деформациям начинается одновременно с разгрузкой по напряжениям, хотя гистерезисный характер диаграмм деформирования сохраняется. Из приведенных данных следует, что этот эффект в слабых породах проявляется сильнее, чем в прочных. Поперечная деформация ϵ_2 быстрее реагирует на изменение интенсивности напряженного состояния: ее увеличение прекращается при уменьшении σ_1 в среднем всего на 22,2 %, причем во многих случаях разгрузка по ϵ_2 начинается одновременно с разгрузкой по σ_1 . Это также свидетельствует об анизотропии скоростей релаксационных процессов в горных породах.

В грунтах начало разгрузки по деформациям зависит от интенсивности нагружения и фазового состава. При интенсивных нагрузках со скоростями нагружения, близкими к предельным, разгрузка по деформациям начинается одновременно с разгрузкой по напряжениям. При неопредельных режимах максимум деформаций наблюдается, когда интенсивность нагружения снижается до некоторой величины σ_* , определяемой влажностью грунта.

Таким образом, релаксационные свойства грунтов и горных пород определяются несколькими механизмами релаксации, основными из которых являются вязкостный, структур-

ный и миграционный (фильтрационный). Их учет необходим не только при разработке теоретических проблем механики грунтов и горных пород, но и при использовании импульсных технологий воздействия на подобные среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вовк А.* Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок / А.А.Вовк, Б.В.Замышляев, Л.С.Евтерев и др. Киев: Наук. думка, 1984.
2. *Лучицкий И.В.* Эксперименты по деформации горных пород в обстановке высоких давлений и температур / И.В.Лучицкий, В.И.Громин, Г.Д.Ушаков. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1967.
3. *Михалюк А.В.* Диссипация энергии динамического нагружения при квазиупругих деформационных процессах в горных породах / А.В.Михалюк, В.В.Захаров // ПИМТФ. 2000. Т. 41. № 3.
4. *Оберт Л.* Хрупкое разрушение горных пород // Разрушение. М.: Мир, 1976. Т. 7. Ч. 1.