

УДК 539.3

## МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА КОЛЬСКОГО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МАЛОПЛОТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

А. М. Брагов, А. К. Ломунов, И. В. Сергеичев

Научно-исследовательский институт механики  
Нижегородского государственного университета, 603950 Нижний Новгород

Предложена модификация метода Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона, позволяющая проводить испытания малоплотных материалов при циклических нагрузках одного знака. Циклические динамические испытания образцов основываются на существенном отличии акустических импедансов материала испытываемого образца и материала мерных стержней. Выбор длины опорного стержня, в несколько раз большей длины нагружающего стержня, позволяет регистрировать импульсы деформаций в нескольких циклах. Приведены результаты применения предложенной модификации метода Кольского при испытаниях на сжатие пенопласта двух плотностей при трех циклах нагружения.

**Введение.** В настоящее время наиболее развитой и обоснованной методикой высокоскоростных испытаний различных материалов является методика Кольского с применением разрезного стержня Гопкинсона [1]. Наряду с традиционными одноцикловыми испытаниями на сжатие, растяжение и кручение эта методика позволяет проводить испытания с регистрацией нескольких циклов импульсного нагружения.

Применение традиционной методики Кольского для циклических испытаний связано с определенными трудностями. Во-первых, корректная регистрация импульсов деформаций в нескольких циклах нагружения осложнена интерференцией волн в мерных стержнях. Во-вторых, при равной длине мерных стержней импульс  $\varepsilon^t$ , прошедший через образец и отраженный от заднего торца опорного стержня в первом цикле нагружения, приходит к образцу одновременно с импульсом  $\varepsilon^r$ , отраженным от образца и вернувшимся к нему вторично, и, следовательно, может исказить картину деформирования образца. Для недопущения возврата этого импульса в [2] предложено использовать стержень-ловушку, пристыкованную к заднему торцу опорного стержня. При этом испытательная установка обеспечивает регистрацию только одного дополнительного цикла нагружения образца.

С целью корректной регистрации нескольких циклов нагружения в [3] предложены схема размещения тензодатчиков (по два на каждом мерном стержне) и необходимый математический аппарат, что позволяет в каждом цикле нагружения выделить соответствующие импульсы деформаций в мерных стержнях. Использование этой схемы при испытаниях пенопласта позволяет регистрировать четыре цикла нагружения образца и исследовать поведение материала при значительном уплотнении (до 80 %).

В отличие от [2, 3], где повторное нагружение производилось импульсом, отраженным от образца в первом цикле нагружения, в работе [4] циклическое нагружение образца обеспечивалось за счет использования ступенчатой наковальни. При этом комбинация нагружающих импульсов создавалась путем подбора площадей поперечных сечений наковальни.

В работах [5–7] с помощью составного ударника образец нагружался импульсами одного знака с варьируемым интервалом между циклами нагружения. При этом амплитуда и длительность импульсов варьировались подбором материалов и длин ударников, а интервал между импульсами — заданием зазора между составными частями ударника. В данной работе для корректной регистрации соответствующих импульсов деформаций и недопущения искажения напряженно-деформированного состояния образца предлагается использовать мерные стержни, отношение длин которых равно количеству регистрируемых циклов. С использованием модифицированной испытательной установки проведены испытания пенопласта при трехцикловом нагружении образца в жесткой ограничивающей обойме импульсами одного знака.

**Экспериментальная установка и условия эксперимента.** Для проведения циклических динамических испытаний малоплотных материалов реализована простая модификация установки [8–10], в основу работы которой положен метод Кольского [1] с использованием разрезного стержня Гопкинсона в качестве основного измерительного инструмента. На рис. 1 показана схема предлагаемого варианта разрезного стержня и волновая ( $X-t$ )-диаграмма при циклическом нагружении образца. С помощью ударника 1 в нагружающем стержне 2 возбуждается упругий импульс  $\varepsilon_1^i$ , который распространяется по стержню со скоростью  $C$  ( $\operatorname{tg} \alpha = C$ ). Длительность возбуждаемого импульса  $\tau_{\text{и}}$  определяется длиной ударника  $L_y$ . При подходе к образцу 4 часть этого импульса отражается волной растяжения  $\varepsilon_1^r$ , а часть проходит через образец в опорный стержень 6 волной сжатия  $\varepsilon_1^t$ . Регистрация импульсов осуществляется тензодатчиками 3 и 5, наклеенными на мерные стержни на одинаковом расстоянии от образца. При существенном различии акустических импедансов материалов стержней и образца амплитуда отраженного импульса может быть значительной. Отраженный импульс распространяется до нагружаемого ударником торца первого мерного стержня и отражается от свободного торца (поскольку

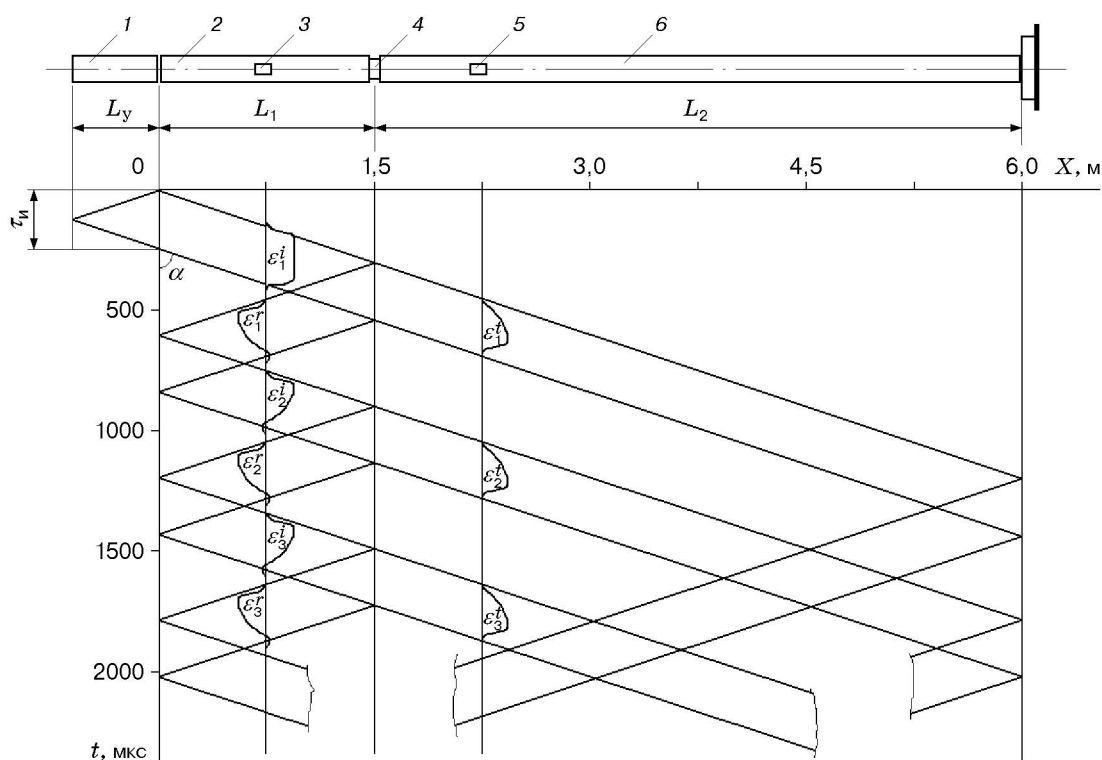


Рис. 1

контакт с ударником уже отсутствует) волной сжатия  $\varepsilon_2^i$ . Вторичная волна нагружает образец, значительная часть ее вновь отражается и т. д. Таким образом, образец подвергается циклическим нагрузкам и разгрузкам с постепенно уменьшающейся амплитудой. Пауза между циклами равна времени двойного пробега импульса деформации по нагружающему стержню (рис. 1). Для проведения испытаний с циклическим нагружением образцов и регистрацией повторных циклов нагружения в ходе одного опыта необходимо исключить возврат от заднего торца опорного стержня к образцу прошедшей через него волны сжатия  $\varepsilon_1^t$ . Для этого длина опорного стержня должна быть больше длины нагружающего стержня во столько раз, сколько циклов нагружения предполагается регистрировать. С учетом этого при проведении испытаний использовались нагружающий мерный стержень длиной  $L_1 = 1,5$  м и опорный стержень длиной  $L_2 = 4,5$  м, что позволило регистрировать три цикла нагружения. Мерные стержни и ударник изготовлены из сплава Д16Т.

Для испытаний были изготовлены образцы из пенопласта плотностью  $\rho = 0,19$  г/см<sup>3</sup> и  $\rho = 0,67$  г/см<sup>3</sup> в форме таблеток диаметром 20 мм и длиной 10 мм. Для изучения свойств пенопласта в условиях объемного напряженного состояния и одноосной деформации образцы испытывались в жесткой ограничивающей обойме. Диаметр образцов был несколько меньше внутреннего диаметра обоймы (зазор около 0,2 мм). Все испытания проводились при комнатной температуре. Для нагружения образцов использовались ударники длиной 200 и 300 мм. Это позволило создавать нагружающие импульсы длительностью до 130 мкс с амплитудой до 200 МПа.

**Результаты испытаний.** В ходе испытаний пенопласта получены осциллограммы, на которых зарегистрированы три луча: с нагружающего мерного стержня, с опорного мерного стержня, а также с ограничивающей обоймы. На рис. 2, а, б показаны осциллограммы, полученные при испытании пенопласта плотностью  $\rho = 0,19$ ;  $0,67$  г/см<sup>3</sup> соответственно. На первом луче осциллограмм зафиксированы и показаны вертикальными штрихами падающие  $\varepsilon_1^i, \varepsilon_2^i, \varepsilon_3^i$  и отраженные  $\varepsilon_1^r, \varepsilon_2^r, \varepsilon_3^r$  импульсы, на втором луче — прошедшие через образец импульсы  $\varepsilon_1^t, \varepsilon_2^t, \varepsilon_3^t$ , на третьем — импульсы окружной деформации  $\varepsilon_1^\theta, \varepsilon_2^\theta, \varepsilon_3^\theta$  с ограничивающей обоймы в первом, втором и третьем циклах нагружения. По оси ординат отложено напряжение, регистрируемое каналами осциллографа. Длительность каждого цикла отмечена на рис. 2 римскими цифрами. Необходимо учитывать, что, поскольку сигнал с опорного стержня (импульс  $\varepsilon^t$ ) дополнительно усиливается (из-за его

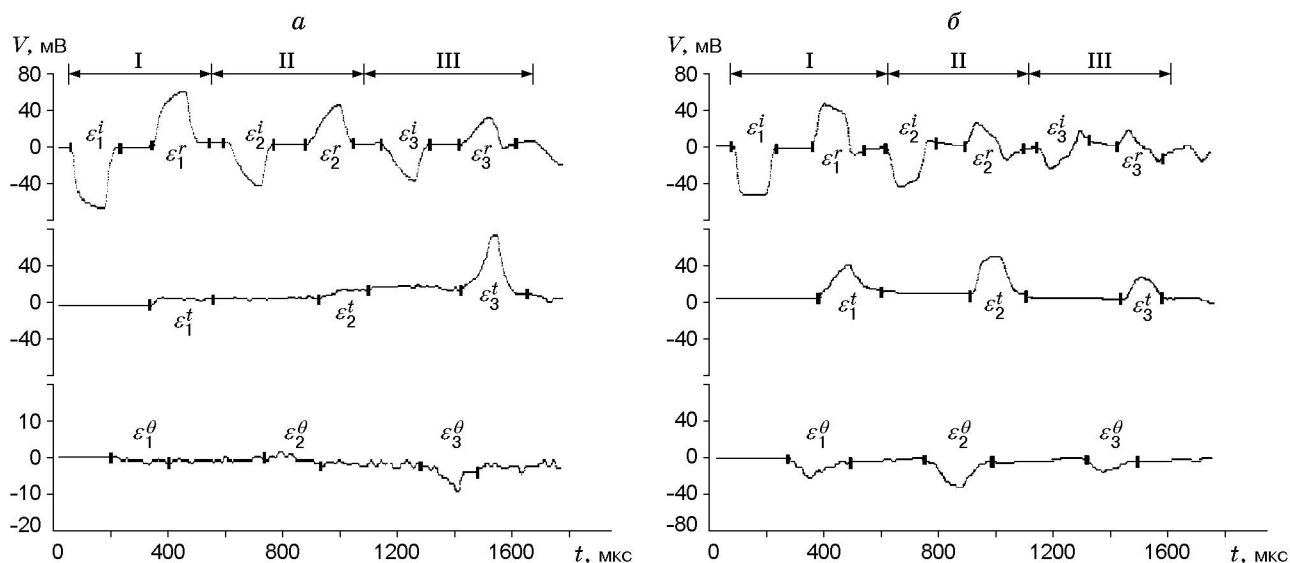


Рис. 2

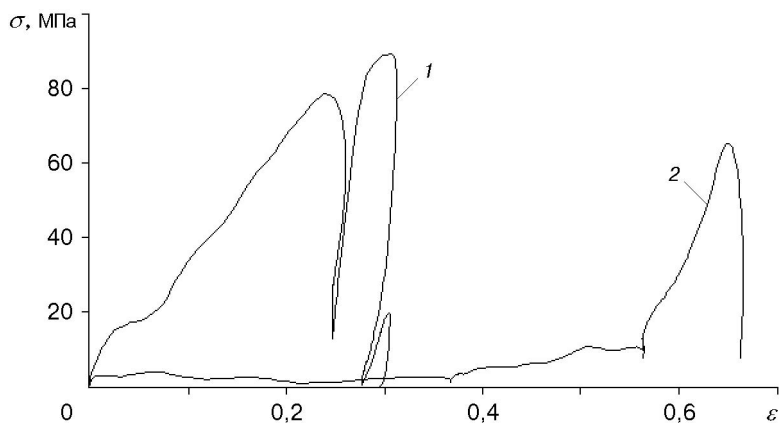


Рис. 3

малости) и при этом инвертируется, на зарегистрированной осциллограмме он имеет обратную полярность. Видно, что отраженный и прошедший импульсы не возвращаются на “нулевую” линию после окончания процесса нагружения, т. е. процесс разгрузки образца пенопласта имеет большую длительность по сравнению с интервалом между регистрацией падающего и отраженного импульсов вследствие вязкопластического характера процесса деформирования. Кроме того, амплитуда отраженного импульса значительна (до 80 % амплитуды исходной падающей волны). Как указано выше, это обусловлено существенным различием акустических импедансов мерных стержней и образца.

Особенностью поведения пенопласта плотностью  $\rho = 0,19 \text{ г/см}^3$  является малая амплитуда прошедшей волны (и соответственно сигнала с обоймы) в первом и втором циклах нагружения образца. Лишь после некоторого уплотнения и выбора зазора между боковой поверхностью образца и внутренней поверхностью обоймы образец начинает пропускать волну достаточно большой амплитуды. При этом появляется сигнал с обоймы (см. рис. 2, а). Сигнал с обоймы в несколько раз меньше амплитуды прошедшей волны и на первых двух циклах практически отсутствует (не виден на фоне шумов). На осциллограмме испытания пенопласта плотностью  $\rho = 0,67 \text{ г/см}^3$  (см. рис. 2, б) амплитуда прошедшей волны уже в первом цикле достаточна для того, чтобы обеспечить регистрацию сигнала с ограничивающей обоймы. Для определения значений напряжения и деформации материала образца этот сигнал в данной работе не использовался. Способ регистрации сигнала с обоймы и его использование для определения параметров сдвиговой прочности подробно описаны в [8–10].

В результате обработки исходных импульсов деформации получают динамические диаграммы с дополнительными циклами нагружения. На рис. 3 представлены диаграммы деформирования образцов пенопласта плотностью  $\rho = 0,67 \text{ г/см}^3$  (кривая 1) и  $\rho = 0,19 \text{ г/см}^3$  (кривая 2) в ограничивающей обойме при близких амплитудах нагружающего импульса. Средние скорости деформации в первом, втором и третьем циклах нагружения составили соответственно 2300, 800, 300  $\text{с}^{-1}$  для кривой 1 и 2600, 1800, 1000  $\text{с}^{-1}$  для кривой 2.

Как отмечено выше, вследствие большой вязкости пенопласта образец после окончания действия нагрузки в каждом цикле не успевает полностью разгрузиться, т. е. напряжения в нем не падают до нуля. Поэтому линия разгрузки после очередного цикла обрывается при некотором уровне напряжений и соответствующей величине деформации. Следующий цикл нагружения начинается именно с этой величины деформации и конечного уровня напряжений. Особенно сильно вязкостный эффект проявляется в пенопласте малой плотности. Для него характерна существенно большая деформативность по сравнению с

пенопластом плотностью  $\rho = 0,67 \text{ г/см}^3$ : лишь после уплотнения образца, соответствующего деформации более 50 % (т. е. при увеличении плотности более чем в два раза), и выбора зазора начинается рост зарегистрированных напряжений в образце. По-видимому, увеличение напряжений в образце происходит не только из-за увеличения плотности, но и вследствие изменения типа напряженно-деформированного состояния образца (начинает работать ограничивающая обойма), что подтверждается наличием импульса с обоймы именно в третьем цикле нагружения (см. рис. 2, а). Влияние изменения условий нагружения на процесс деформирования для образцов плотностью  $\rho = 0,19 \text{ г/см}^3$  обнаруживается только в третьем цикле нагружения, а для образцов плотностью  $\rho = 0,67 \text{ г/см}^3$  — уже в первом. Существенное снижение уровня напряжений в третьем цикле нагружения для образцов из пенопласта большей плотности обусловлено уменьшением амплитуды отраженного импульса после второго цикла нагружения, что, в свою очередь, обусловлено значительным уплотнением материала и как следствие ростом амплитуды прошедшей волны и соответствующим уменьшением амплитуды отраженной волны.

На рис. 3 видно, что модули нагрузочных ветвей возрастают от цикла к циклу. При этом нагрузочная ветвь диаграммы для пенопласта плотностью  $\rho = 0,67 \text{ г/см}^3$  в первом цикле нагружения образца нелинейна, что может быть обусловлено уплотнением и изменением первоначальной структуры материала. Следует отметить, что значения модулей нагрузочных ветвей пенопласта меньшей плотности в третьем цикле (после уплотнения) и пенопласта большей плотности в первом цикле близки. В отличие от нагрузочных ветвей диаграммы деформирования модули ветвей разгрузки практически не изменяются от цикла к циклу и слабо зависят от скорости деформации.

В общем случае механические характеристики пенопластов определяются большим числом химических, физических и технологических параметров, которые влияют на свойства полимерной матрицы, распределение плотности и анизотропию ячеистой структуры. Поэтому описание упругих и прочностных свойств пенопластов с использованием в качестве параметров только деформации или плотности является неполным.

**Закключение.** В проведенных экспериментах обнаружены большая деформативность испытанных материалов, существенная нелинейность на ветвях нагружения, а также значительное отличие разгрузочных ветвей от нагрузочных, что обусловлено, по-видимому, сложной реологией пенопласта.

Предлагаемая модификация метода Кольского может быть использована и при испытаниях на растяжение по методике Николаса [7], поскольку в этом случае из-за значительного различия площадей поперечных сечений мерных стержней и образца (12 : 1) отраженный импульс также имеет большую амплитуду.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Кольский Г.** Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения // *Механика*. 1950. Вып. 4. С. 108–119.
2. **Lindholm U. S.** Some experiments with the split Hopkinson pressure bar // *J. Mech. Phys. Solids*. 1964. V. 12. P. 317–335.
3. **Zao H., Gary G.** Large strain range dynamic testing at high and medium strain rates, using a common scale SHPB // *J. Physique IV*. 1997. V. 7. P. 341–346.
4. **Ogawa K.** Impact-tension compression test by using a split Hopkinson bar // *Exp. Mech*. 1984. V. 24, N 2. P. 81–85.
5. **Брагов А. М., Ломунов А. К.** Упругопластические свойства алюминиевого сплава АМг6М при высоких скоростях деформации // *ПМТФ*. 1988. № 5. С. 168–171.

6. **Bragov A. M., Lomunov A. K., Medvedev A. A.** A modified Kolsky method for the investigation of the strain-rate history dependence of mechanical properties of materials // J. Physique IV. 1991. V. 1. P. C3-471–C3-475.
7. **Bragov A. M., Lomunov A. K.** Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method // Intern. J. Impact Engng. 1995. V. 16, N 2. P. 321–330.
8. **Bragov A. M., Grushevsky G. M., Lomunov A. K.** Use of the Kolsky method for studying shear resistance of soils // ДУМАТ J. 1994. V. 1, N 3. P. 253–259.
9. **Брагов А. М., Гандурин В. П., Грушевский Г. М., Ломунов А. К.** Новые возможности метода Кольского для исследования динамических свойств мягких грунтов // ПМТФ. 1995. Т. 36, № 3. С. 179–186.
10. **Bragov A. M., Grushevsky G. M., Lomunov A. K.** Use of the Kolsky method for confined tests of soft soils // Exp. Mech. 1996. V. 36, N 9. P. 237–248.

*Поступила в редакцию 16/IV 2001 г.*

---