

УДК 539.3

Е.А. Николаева

Институт механики сплошных сред УрО РАН

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ СТЕРЖНЯ ГОПКИНСОНА – КОЛЬСКОГО

Abstract

This paper is concerned with the peculiarities of dynamic processing of a split Hopkinson pressure bar (SHPB) in dynamic compression tests. A refined version of the formula used to describe the SHPB dynamic calibration subject to compression is proposed. In this study a modified split Hopkinson pressure was used. M1 copper specimens were tested at strain rates in the range from 500 to 2000 s⁻¹ at pressure of 1 GPa. It has been shown that repeated loading of specimens leads to unloading and, in consequence, the segment with negative amplitude takes place on the reflected pulse of deformation. To ensure that unloading of the specimen occurs, a number of experiments have been performed on specimen-“satellites” made of Sn-Pb alloy (90% Sn). The analysis of the obtained results shows that the true maximal deformation measured using the specimen-“satellite” agrees satisfactorily with the deformation measured in the main specimen.

Разрезной стержень Гопкинсона – Кольского – современное стандартное экспериментальное оборудование для изучения поведения материала в диапазоне средних скоростей деформации ($10^2 - 10^4 \text{ с}^{-1}$). Эта техника берет свое начало в работах Б. Гопкинсона (Hopkinson, 1914), который первым использовал длинный тонкий стержень для определения формы импульсов, вызванных ударом на его конце. Современный вид оборудования, с использованием двух стержней, был предложен Г. Кольским [1] и стал известен как разрезной стержень Гопкинсона – Кольского.

Метод Гопкинсона – Кольского

Обычный разрезной стержень Гопкинсона – Кольского состоит из двух длинных стержней (входного и выходного), между которыми располагается образец в форме таблетки, снаряда и газовой пушки (рис.1).



Рис. 1. Разрезной стержень Гопкинсона-Кольского

При ударе снаряд передает импульс упругого сжимающего напряжения во входной стержень. Часть импульса проходит через образец, а часть отражается вследствие разницы в площадях сечений и механических свойств стержня и образца. Тензодатчики, находящиеся на входном и выходном стержнях, позволяют измерить отраженный импульс $\varepsilon_R(t)$ (пропорциональный скорости деформации в образце) и прошедший импульс $\varepsilon_T(t)$ (пропорциональный напряжению в образце), показанные на рис. 2, 3. Одномерный волновой анализ метода Гопкинсона – Кольского известен по многочисленной литературе [1, 2]. Скорость деформации образца и напряжение в нем определяются следующими выражениями:

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2c_B \varepsilon_R(t)}{l_S}, \quad (1)$$

$$\sigma(t) = \frac{EA \varepsilon_T(t)}{A_S}, \quad (2)$$

где c_B – скорость упругой волны в стержне, E – модуль Юнга материала стержня, A и A_S – площади поперечного сечения в стержне и в образце, соответственно. При построении диаграммы $\sigma - \varepsilon$ необходимо учитывать, что l_S – мгновенная длина и A_S – мгновенная площадь поперечного сечения образца.

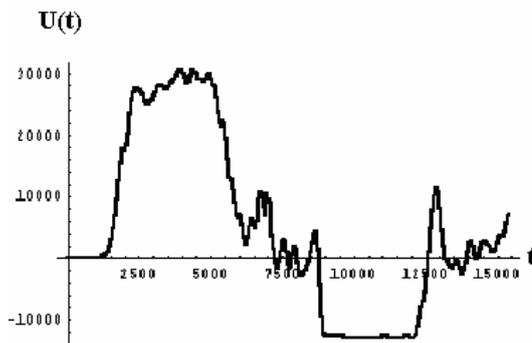


Рис. 2. Начальный и отраженный импульсы деформации $\varepsilon_I(t)$ и $\varepsilon_R(t)$

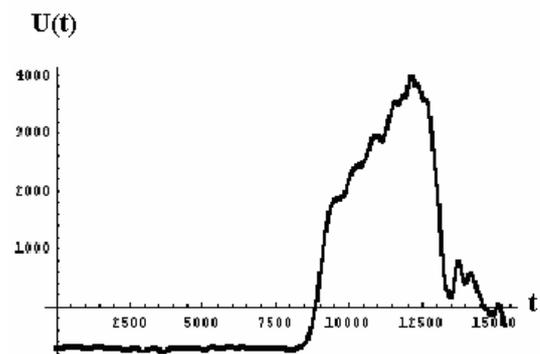


Рис. 3. Прошедший импульс деформации $\varepsilon_T(t)$

При получении уравнений (1), (2) использовались три основных предположения метода:

- 1) во время эксперимента образец подвергается однородной деформации;
- 2) импульсы деформации (отраженный и прошедший) подвергаются минимальной дисперсии;
- 3) стержни остаются упругими и торцы стержней, находящиеся в контакте с образцом, остаются плоскими и параллельными во все время эксперимента.

При выводе определяющих соотношений (1) и (2) используется следующее главное условие метода Гопкинсона – Кольского:

$$\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) = \varepsilon_T(t). \quad (3)$$

Это соотношение является прямым следствием закона сохранения импульса, поэтому при построении диаграммы $\sigma - \varepsilon$ достаточно достоверно знать два любых импульса деформации. Основная трудность при обработке экспериментальных данных состоит в согласовании этих импульсов во времени. Обычно тензодатчики размещаются на входном и выходном стержнях на равных расстояниях от образца, точно посередине

обоих стержней, так что отраженная и прошедшая волны деформации приходят к каждому датчику одновременно, и совместить импульсы деформации во времени возможно без затруднений.

Динамическая калибровка разрезного стержня Гопкинсона – Кольского

Неоспоримое достоинство метода Гопкинсона – Кольского состоит в том, что эта техника позволяет проводить сквозную калибровку экспериментальной аппаратуры. Для того чтобы определить все параметры устройства, необходимо знать лишь размеры стержней и их массу, остальные параметры определяются в результате динамической калибровки. Динамическая калибровка проводится на входном и выходном стержнях, состыкованных вместе, без образца. В этом случае, поскольку волновые импедансы стержней одинаковы, волна деформации проходит через разрыв стержней без искажений, так что на входном стержне мы видим только один импульс сжимающего напряжения. Это позволяет, минуя точный расчет сигналов с датчиков, переходных характеристик усилителей и т.п., провести динамическую калибровку разрезного стержня.

Метод Гопкинсона – Кольского основан на точном решении волнового уравнения и использует свойства распада разрыва волны, проходящей через стержни, что обеспечивает высокую точность результатов эксперимента. Действительно, из дифференциального уравнения упругой волны

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

можно достоверно определить скорость упругой волны в стержне

$$c_B = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (4)$$

где E – модуль Юнга и ρ – плотность материала стержня.

Скорость упругой волны в стержне и его модуль упругости можно также определить из динамической калибровки стержня. Сигнал, поступающий с тензодатчика на входном стержне, представляет собой только один сжимающий импульс, в то время как тензодатчик, расположенный на выходном стержне, генерирует периодический сигнал, период которого T равен времени двукратного прохождения волны по стержню длиной L_{BAR} . Тогда скорость упругой волны в стержне c_B и модуль упругости стержня определяются следующими выражениями:

$$c_B = \frac{2L_{BAR}}{T},$$

$$E = c_B^2 \rho.$$

Чтобы вывести формулу для динамической калибровки разрезного стержня Гопкинсона – Кольского, рассмотрим процесс взаимодействия снаряда с входным стержнем. Пусть $L/2$ – длина снаряда. Тогда длина импульса равна L , поскольку при столкновении снаряда со стержнем волна сжатия формируется как во входном стержне, так и в снаряде, причем в последнем она распространяется к свободному концу, отражаясь от него волной растяжения (разгрузки). В момент прихода волны разгрузки к входному стержню прекращается воздействие снаряда на стержень, и волна проходит путь, равный L .

Закон сохранения энергии можно записать в следующем виде:

$$\rho S \frac{L v^2}{2} = \frac{k(\varepsilon L)^2}{2}. \quad (5)$$

Левая часть уравнения – кинетическая энергия ударника (ρ , S и v – плотность материала, площадь поперечного сечения и скорость снаряда, соответственно). Правая часть уравнения – потенциальная энергия стержня (k – коэффициент упругости стержня и (εL) – перемещение упругосжатого участка стержня длиной L). Силу упругости можно записать в виде $F = kx$ или $F = \sigma S$. Учитывая, что $\sigma = E\varepsilon$ (E – модуль Юнга стержня), выразим коэффициент упругости стержня в следующем виде:

$$k = \frac{ES}{L}. \quad (6)$$

Подставив (4) и (6) в (5), получим

$$\varepsilon^2 = \frac{v^2}{2c_B^2}. \quad (7)$$

Следовательно, максимальная деформация

$$\varepsilon_{\max} = \frac{v}{\sqrt{2}c_B}. \quad (8)$$

Датчики, расположенные на входном и выходном стержнях, реагируют на волну деформации каждый со своим коэффициентом чувствительности. Аппаратура калибруется посредством регистрации откликов тензодатчиков на одну и ту же амплитуду волны деформации. На рис. 4, 5 изображены электрические импульсы, полученные на входном и выходном стержнях.

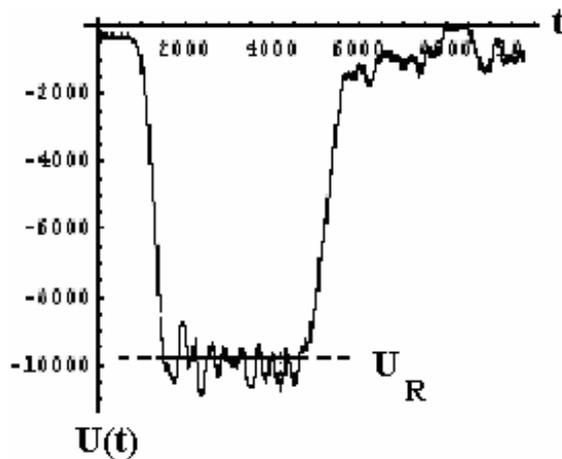


Рис. 4. Импульс на входном стержне

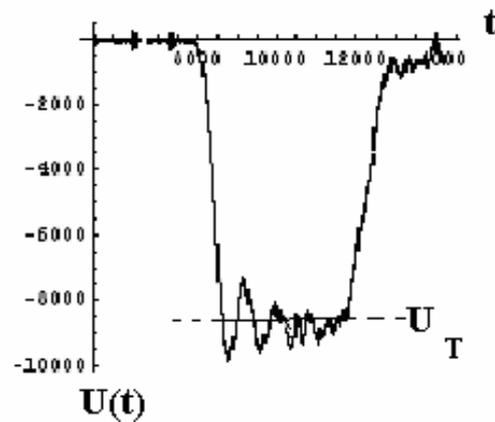


Рис. 5. Импульс на выходном стержне

Калибровочный коэффициент K_R для входного стержня определяется выражением

$$K_R = \varepsilon_{\max} / U_R, \quad (9)$$

где U_R – среднее значение импульса на входном стержне.

Аналогично калибровочный коэффициент K_T для выходного стержня

$$K_T = \varepsilon_{\max} / U_T, \quad (10)$$

где U_T – среднее значение импульса на выходном стержне.

Таким образом, импульсы деформации на входном и выходном стержнях, соответственно определяются как

$$\varepsilon_R(t) = K_R U(t), \quad (11)$$

$$\varepsilon_T(t) = K_T U(t). \quad (12)$$

Особенности расчета диаграммы $\sigma - \varepsilon$ при повторных нагружениях образцов

Несмотря на то, что метод Гопкинсона – Кольского позволяет точно определять одномерное напряженное состояние образца, с его помощью невозможно установить микроструктурные изменения, связанные с историей нагружения, поскольку образец многократно подвергается повторному нагружению посредством ударных волн, которые отражаются от свободных концов стержней. Микроструктурные исследования становятся возможными при использовании модифицированной версии разрезного стержня Гопкинсона – Кольского [3], в которой образец подвергается однократному импульсу напряжения предопределенного профиля и затем извлекается из экспериментальной установки, не подвергаясь какому-либо повторному нагружению.

Существует другая модификация экспериментальной установки [4], в которой выходной стержень значительно короче входного. В ней используется следующий принцип работы: за то время, как повторная отраженная волна растяжения во входном стержне достигает образца волной сжатия, выходной стержень отодвигается от последнего, что позволяет в этот момент удалить образец, обеспечивая однократное нагружение материала. В этом случае также реализуется однократное нагружение материала, но при обработке экспериментальных данных, в отличие от обычной схемы, используется только один сигнал, поступающий с тензодатчика, расположенного на входном стержне. Автором работы попеременно использовались обе модификации разрезного стержня Гопкинсона – Кольского в зависимости от поставленной задачи.

Для того чтобы сопоставить изменение деформационных характеристик материала с эволюцией его структуры, была проведена серия экспериментов при скоростях деформации в диапазоне от 500 до 2000 с⁻¹ на образцах, изготовленных из меди М1. Использовалась экспериментальная установка, в которой стержни и снаряд изготовлены из конструкционной стали. Размеры входного и выходного стержней соответственно 720 и 713 мм, их диаметр 30 мм. Снаряд длиной 197 мм и 30 мм в диаметре приводился в движение 46-миллиметровой газовой пушкой. Использовались образцы диаметром 14±0,05 мм и длиной 6±0,3 мм.

Пять образцов подвергались нагружению по схеме [3] следующим образом: первый образец – одно нагружение; второй – два нагружения, и т.д. Скорость снаряда в экспериментах поддерживалась в диапазоне 16–18 м/с. После каждого испытания образец обмерялся с помощью обычных измерительных приборов (штангенциркуль, микрометр). Таким образом происходил независимый контроль процесса деформирования образца, т. е. сравнение реальной деформации образца с деформацией, измеренной посредством разрезного стержня Гопкинсона – Кольского.

Как упоминалось выше, на разрезном стержне Гопкинсона – Кольского имеет силу закон сохранения импульса, поэтому длительности начального, отраженного и прошедшего импульсов строго одинаковы. С учетом калибровочных коэффициентов, полученных из динамической калибровки стержня по выражениям (9) и (10), отраженный и прошедший импульсы деформации определяются из соотношений (11) и (12). Из результатов многочисленных экспериментов можно видеть, что реальная

деформация образца после первого нагружения совпадает с измеренной с точностью 2%. Благодаря этому факту может возникнуть ошибочное заключение, что калибровать стержень возможно по реальной деформации образца. Как показали эксперименты по повторному нагружению образца, этого нельзя допускать, поскольку образец может значительно разгрузиться. На рис. 6 представлено сравнение импульсов деформации, полученных при первом и втором нагружениях образца e1. Если принимать во внимание длительность начального импульса деформации, при повторном нагружении образца отраженный импульс деформации имеет не только положительный, но и отрицательный участок (участок разгрузки). Действительно, с учетом этого замечания, измеренная деформация образца достаточно точно совпадает с реальной деформацией.

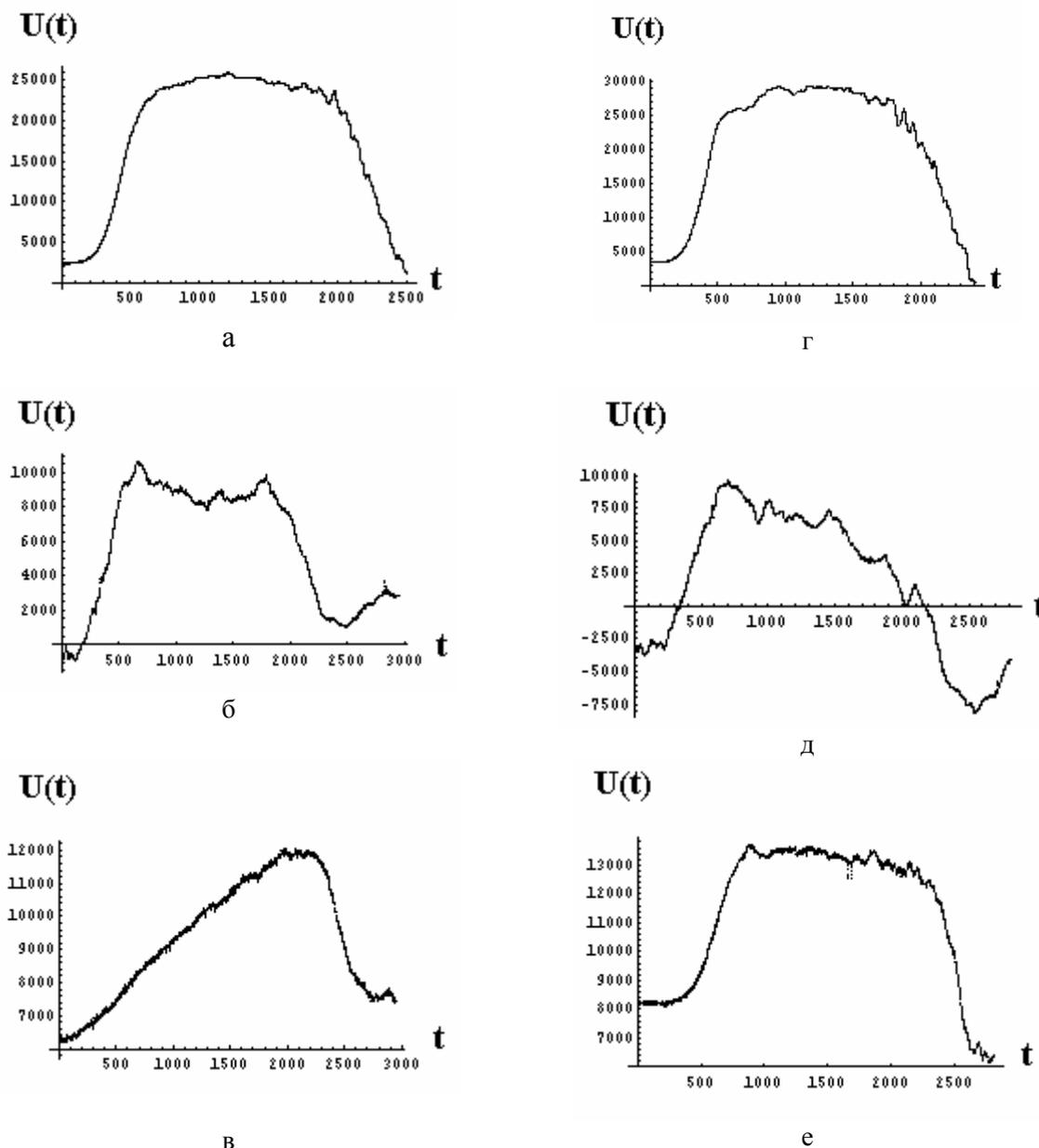


Рис. 6. Сравнение импульсов деформации при первом (а – начальный, б – отраженный, в – прошедший импульсы деформации) и втором нагружениях образца e1 (г – начальный, д – отраженный, е – прошедший импульсы деформации)

Чтобы подтвердить факт разгрузки материала образца в результате деформирования, были проведены эксперименты с образцами-спутниками, изготовленными из сплава ПОС-90. Диаметр образцов-спутников равнялся 3 мм. Основной образец располагался, как и в обычном эксперименте на сжатие, по оси входного и выходного стержней. Образец-спутник с помощью резинового кольца прикреплялся рядом с основным образцом. Благодаря высокой пластичности сплава образец-спутник в результате деформирования не подвергался разгрузке, и его остаточная деформация достаточно точно соответствовала максимальной деформации основного образца. В таблице приведены результаты этого эксперимента. Видно, что после первого нагружения деформации основного образца и образца-спутника практически совпадают, в то время как после второго нагружения они значительно расходятся, т.е. подтверждается разгрузка основного образца.

Номер нагружения	Образец и спутник	Основной образец	Образец-спутник
	Толщина до деформации, мм	Толщина после деформации, мм	Толщина после деформации, мм
1-е нагружение	6,27	4,90	4,93
2-е нагружение	4,90	4,30	4,24
3-е нагружение	4,30	3,89	3,89
4-е нагружение	3,89	3,68	3,69

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №02-01-00736 и НОЦ №0201М006И.

Библиографический список

1. Kolsky H. An investigation of mechanical properties of materials at very high rates of loading // Proceedings of the Physics Society of London. – B62. – 1949. – P. 676-700.
2. Lindholm U.S. Some experiments with the split Hopkinson pressure bar // J. Mech. Phys. Solids. – № 12. – 1964. – P. 317-335.
3. Nemat-Nasser S., Isaacs J.B., and Starrett J.E. Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments // Proc. R. Soc. Lond. – A 435. – 1991. – P. 371-391.
4. Chen W., and Ravichandran G. Dynamic compressive failure of a glass ceramic under lateral confinement // J. Mech. Phys. Solids. – № 45. – 1997. – P. 1303-1328.

Получено 15.06.2003