

УДК 539.3

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ

© 2011 г.

А.М. Брагов¹, Э. Кадони², Л. Крушка³

¹НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

²Университет прикладных наук Южной Швейцарии, Каноббио (Швейцария)

³Военно-технический университет, Варшава (Польша)

bragov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Освещено современное состояние методов испытаний материалов различной физической природы при скоростях деформации 10^2 – 10^4 с⁻¹. Рассматриваются наиболее обоснованные и распространенные методы и экспериментальные комплексы для их реализации, используемые в ведущих лабораториях как у нас в стране, так и за рубежом. Анализируются сложности проведения динамических экспериментов и обработки получаемых данных, связанные с неоднородностью напряженно-деформированного состояния образца, с влиянием на получаемые свойства инерционных сил и сил трения. Представлен критический анализ таких известных методов динамических испытаний, как метод Тейлора, метод прямого удара, метод Кольского и его модификации. Отмечается, что наиболее обоснованным и обладающим наибольшим разнообразием испытаний (растяжение, сжатие, кручение, сдвиг, трещиностойкость и т.д.) является метод Кольского.

Ключевые слова: высокоскоростная деформация, методы динамических испытаний, механические свойства, диаграмма деформирования, скорость деформации.

Одной из актуальных проблем экспериментальной механики деформируемого твердого тела является исследование закономерностей поведения материалов различной физической природы в широком диапазоне изменения температур, скоростей деформации и амплитуд нагрузок. Особое место в подобных исследованиях отводится вопросу влияния скорости деформации и истории ее изменения на физико-механические свойства материалов при скоростях деформации 10^2 – 10^5 с⁻¹.

Однако в силу больших методических трудностей проведения высокоскоростных испытаний, с одной стороны, и расширением круга новых конструкционных материалов (керамики, наноструктурные материалы, материалы с эффектом памяти формы и т.д.), с другой, проблемы высокоскоростной деформации до сих пор остаются нерешенными.

Приводится анализ современного состояния проблемы изучения процессов высокоскоростного деформирования и разрушения материалов различной физической природы. Рассмотрены методы динамических испытаний, получившие наибольшее развитие.

Отмечено, что в настоящее время основными методами исследования динамических свойств материалов при скоростях деформации 10^2 – 10^4 с⁻¹ являются копрывые испытания, задача кольцевых образцов, метод Тейлора, метод разрезного стер-

жня Гопкинсона и его модификации, метод прямого удара.

В методе копрывых испытаний для создания динамической нагрузки используются копры со свободно падающим грузом, копры с резиновыми или пружинными ускорителями, маятниковые или ротационные копры. Основные регистрируемые параметры – скорость удара и усилие в образце, измеренное динамометрическим способом. В копрывых испытаниях подбирают условия нагружения таким образом, что кинетическая энергия падающего груза во много раз превосходит работу по разрушению образца. При этом полагают, что в процессе испытания скорость деформации постоянна, т.е. $\dot{\epsilon} \approx \text{const}$. Это условие и измеренное усилие дают возможность строить динамическую диаграмму деформирования при скорости деформации 10^2 – 10^3 с⁻¹. Однако, как показал вычислительный и физический эксперимент, условие постоянства скорости не всегда выполняется, особенно при испытаниях высокопрочных материалов.

В методе задачи кольцевого образца под действием симметричного радиального давления в тонком кольце реализуются условия одноосного напряженного состояния, а в трубчатом образце – условия плоской деформации при высоких скоростях деформации. При свободной задаче кольцевых образцов регистрируют только радиальную

раздачу $W(t)$, однако для вычисления напряжений требуется процедура однократного или двукратного дифференцирования полученной экспериментальной кривой $W(t)$, при которой могут возникать существенные погрешности при построении динамической диаграммы деформирования. Вследствие этого методика раздачи кольца пока не получила широкого распространения из-за недостаточной точности определения напряжений.

Метод Тейлора из-за простоты в реализации находит широкое применение для определения динамических свойств. Этот метод дает хорошие результаты при определении предела текучести для материалов, поведение которых близко к идеально-пластическому поведению. В случае испытания материалов с хорошим упрочнением метод дает осредненные значения напряжений течения. В настоящее время этот метод в основном используется для верификации уравнений состояния и моделей поведения материала на основе сравнения текущей формы образца в процессе соударения и результатов численного расчета с использованием этих моделей. Как правило, для регистрации формоизменения образца при соударении применяется высокоскоростная киносъемка.

Метод прямого удара имеет две модификации в зависимости от способа формирования нагрузки: инерционный и волновой. Основными измеряемыми параметрами в этом методе являются скорость удара и усилие в образце, которое вычисляется по показаниям тензодатчиков, наклеенных на мерном стержне-динамометре.

Среди известных к настоящему времени методов динамических испытаний наибольшее распространение получил метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) ввиду своей хорошей теоретической обоснованности и простоты реализации. Эта методика позволяет проводить испытания широкого круга материалов в диапазоне скоростей деформации 10^2 – 10^4 с⁻¹.

Преимущества этого метода – простота реализации, корректное теоретическое обоснование явлений, происходящих в системе мерные стержни-образец, точное определение значительных (десятки процентов) деформаций образца, благодаря косвенности измерений, а также исключение изгиба образца ввиду его малой длины. Кроме того, эта методика позволяет регистрировать историю изменения скорости деформации в течение всего процесса деформирования образца.

К настоящему времени, кроме основной схемы на сжатие образца, разработаны другие варианты РСГ (растягивающий, крутильный, двухосный и т.д.). Также на основе этого метода разработаны схемы для определения характеристик трещиностойкости. Особое место среди модификаций этого метода занимают модификации для испытаний малоплотых и малосвязных материалов в жесткой обойме, которые позволяют определять динамическую сжимаемость и прочностные свойства подобных материалов при скоростях деформации $\sim 10^3$ с⁻¹ и амплитудах нагрузки до 2 ГПа.

MODERN METHODS OF DYNAMICALLY TESTING THE MATERIALS

A.M. Bragov, E. Cadoni, L. Kruszka

The report describes the state of art of the modern methods for testing materials of various physical nature in the strain-rate range of 10^2 – 10^4 s⁻¹. The most substantiated and widely used methods and experimental complexes for their implementation used at the leading laboratories both home and abroad are considered. Difficulties arising in dynamic experiments and in processing the acquired data connected with the inhomogeneity of the stressed-strained state of specimens and the effect of inertia and friction forces on the resulting properties are discussed. A critical analysis of such well-known dynamic testing methods as Taylor's method, direct impact method and Kolsky method and its modifications is given. It is concluded that Kolsky method is the most substantiated method having the largest variety of tests (tension, compression, torsion, shear, crack resistivity, etc.).

Keywords: high-rate strain, dynamic testing methods, mechanical properties, deformation diagram, strain rate.