

УДК 530.17:539.214.9:53.072.8

О ФИЗИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ УДАРНЫХ И ВЗРЫВНЫХ НАГРУЗОК

© 2011 г.

В.И. Пусев

МГТУ им. Н.Э. Баумана

mva_2805@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Исследуются вопросы физического моделирования деформирования и разрушения конструкций при ударных и взрывных нагрузках применительно к крупномасштабным моделям, которые не более чем в 10 раз меньше натуральных конструкций. Приведены оценки влияния скорости деформирования и масштабного эффекта, а также примеры использования крупномасштабных моделей конструкций при ударных и взрывных нагрузках.

Ключевые слова: физическое моделирование, деформирование и разрушение конструкций, ударные и взрывные нагрузки, крупномасштабные модели.

Экспериментальные исследования, проводимые на уменьшенных моделях конструкций, требуют специальных приемов постановки опытов и интерпретации полученных результатов для количественного описания полномасштабных процессов в натуральных конструкциях. Решение этой задачи построено на теории подобия и моделирования физических явлений, которая является методологической основой постановки и обработки экспериментальных исследований с помощью уменьшенных моделей [1]. При физическом моделировании модель геометрически подобна натурной конструкции и изготавливается из идентичных натуре материалов. Тогда сходственные линейные размеры и интервалы времени будут в модели в k раз меньше по отношению к натуре, а скорости сходственных частиц, давления (компоненты тензора напряжений), деформации и плотности в модели и натуре будут равны [1, 2]. Однако скорость деформирования сходственных элементов в модели будет в k раз больше, чем в натуре, и в большей степени повлияет на изменение механических характеристик материала модели, что может приводить к существенным отличиям процессов деформирования и разрушения модельной и натурной конструкций.

Под конструкциями понимаются корабельные, авиационные и ракетно-космические конструкции, для которых общим является то, что они представляют собой, как правило, комбинации тонких пластин и оболочек, изготовленных из металлов. Известно [3] деление уменьшенных моделей этих конструкций на крупномасштабные (полунатурные) при $k < 10$ и упрощенные при

$10 < k < 50$, основанное на сохранении основных натуральных технологий при изготовлении крупномасштабных моделей. Тогда можно оценить адекватность крупномасштабных моделей натуре с позиций влияния скорости деформирования на механические свойства металлов и влияния масштабного эффекта на разрушение указанных конструкций, изготовленных из стали или алюминиевых сплавов.

В большинстве практических случаев для материала натуре скорость деформирования составит порядок 100 с^{-1} , тогда для материала крупномасштабной модели скорость деформирования не превысит 1000 с^{-1} . Следует отметить, что оценить изменение предела текучести в указанном диапазоне скоростей деформаций возможно на основе зависимостей величины предела текучести от скорости деформаций типа приведенных на рис. 1 [4] (цифрами и буквами на графиках обозначены марки стали [4]).

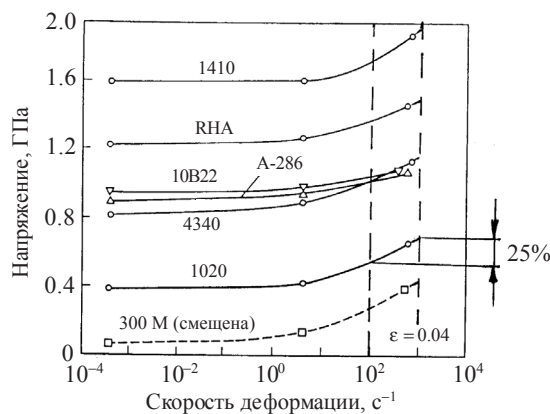


Рис. 1

Увеличение динамического предела текучести при переходе от скорости деформирования 100 с^{-1} к 1000 с^{-1} можно установить по известным данным [4–6] для различных марок стали и алюминивно-магниевого сплава АМг-6, и оно составит в зависимости от материала величину в диапазоне от 5 до 30%, что сопоставимо с ошибками обработки экспериментальных результатов. Полученный результат объясняет удовлетворительное совпадение с натурными экспериментами данных, полученных на крупномасштабных моделях стальных ударников с твердосплавными сердечниками ($k = 2.50$; 2.36) при исследовании процессов пробития и проникания в стальные преграды со скоростью удара до 1450 м/с [7] и данных, полученных на крупномасштабной модели подводной лодки ($k = 2.67$) по взрывостойкости ее стального корпуса [3]. Аналогичные результаты получены при деформировании и разрушении геометрически подобных сферических оболочек ($k = 3.3$) из АМг-6 при внутренней взрывной нагрузке [8–11]. В последнем случае не наблюдались масштабные эффекты при разрушении оболочек, отмеченные в работах [12–14]. Это связано с тем, что относительная толщина оболочек (отношение толщины оболочки к ее радиусу) в [8–11] составляла 0.026 (тонкостенная оболочка, характерная для ракетно-космических конструкций [11]) против 0.214 (толстостенная оболочка) в [12–14], что повлияло на особенности процесса разрушения.

Если в [12–14] реализовывалось хрупкое разрушение стальных (сталь 22к) сфер, а энергия разрушения была пропорциональна площади трещин, то в [8–11] был выявлен двухстадийный механизм разрушения (деформирование материала оболочки и шейкообразование, предшествующее появлению трещин), а энергия разрушения была практически пропорциональна объему деформируемого материала оболочки. В связи с этим для указанных конструкций существует возможность получения на крупномасштабных моделях экспериментальных результатов, которые будут практически соответствовать натурным при ударных и взрывных нагрузках.

В работе по подготовке материалов доклада принимали участие В.А. Марков и А.Ф. Овчинников.

Работа выполнена при поддержке АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.2/4343).

Список литературы

1. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. 6-е изд., доп. М.: Наука, 1967. 438 с.
2. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. 3-е изд., перераб. В 2-х т. Т.2. М.: Физматлит, 2002. 656 с.
3. Кейл А. Проблемы пластичности корабельных конструкций при взрывном и ударном нагружении // Механика (сб. перев.). 1961. №2. С. 107–123.
4. Динамика удара: Пер. с англ. / Под ред. С.С. Григоряна. М.: Мир, 1985. 296 с.
5. Орленко Л.П. Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках. М.: Машиностроение, 1964. 167 с.
6. Ударные волны и экстремальные состояния вещества / Под ред. В.Е. Фортова, Л.В. Альтшулера, Р.Ф. Трунина, А.И. Фунтикова. М.: Наука, 2000. 425 с.
7. Частные вопросы конечной баллистики / Под ред. В.А. Григоряна. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 592 с.
8. Овчинников А.Ф., Маркин В.Т., Пусев В.И. Вопросы поведения тонкостенных замкнутых оболочек при импульсных нагрузках // Труды МВТУ №340. Вопросы физики взрыва и удара. Вып. 2. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1980. С. 60–71.
9. Овчинников А.Ф., Маркин В.Т., Пусев В.И. О моделировании деформирования и разрушения тонкостенных сферических оболочек при внутренней взрывной нагрузке // Тез. докл. научно-технич. конф. к 170-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, 21–23 ноября 2000 г. в 2-х т. Т. 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. С. 155.
10. Маркин В.Т. и др. Графоаналитический метод расчета разрушения тонкостенных сферических оболочек при внутренней взрывной нагрузке // Оборонная техника. 2002. №1, 2. С. 49–52.
11. Иванов В.Н. и др. Метод расчета степени фрагментации космического аппарата сферической формы при внутренней взрывной нагрузке // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Матер. IX Междунар. симпозиума. Ярополец, 10–14 февраля 2003 г. М.: Изд-во МАИ, 2003. С. 159–160.
12. Иванов А.Г., Новиков С.А., Сеницын В.А. Исследование поведения замкнутых стальных оболочек при взрыве внутри них зарядов взрывчатого вещества // Журнал прикладной механики и технической физики. 1968. №6. С. 94–98.
13. Иванов А.Г., Сеницын В.А., Новиков С.А. Масштабные эффекты при динамическом разрушении конструкций // ДАН СССР. 1970. Т. 194, №2. С. 316–317.
14. Иванов А.Г., Новиков С.А., Сеницын В.А. Масштабный эффект при взрывном разрушении замкнутых стальных сосудов // Физика горения и взрыва. 1972. №1. С. 124–129.

**ON THE PHYSICAL MODELING OF DEFORMATION AND FAILURE OF STRUCTURES
SUBJECTED TO IMPACT AND EXPLOSIVE LOADING**

V.I. Pusev

Issues of physically modeling deformation and failure of structures subjected to impact and explosive loading, using large-scale models, with the scale factor not larger than 10, are discussed. Estimations of the effects of the deformation rate and of the scale factor are also shown, as well as application examples of the models of large-scale structures subjected to impact and explosive loading.

Keywords: physical modeling, deformation and failure of structures, impact and explosive loads, large-scale models.