

УДК 539.3

## О КРИТЕРИЯХ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2011 г. П.А. Моссаковский<sup>1</sup>, Ф.К. Антонов<sup>1</sup>, М.Е. Колотников<sup>2</sup>, Л.А. Костырева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

<sup>2</sup>Научно-производственный центр газотурбостроения «Салют», Москва

moss@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Один из наиболее важных факторов, обеспечивающих адекватность математического моделирования предельных состояний элементов конструкций, – правильный выбор критерия локального разрушения материала и точность определения его параметров. На примере задачи о пробивании преграды обсуждаются некоторые традиционные подходы к построению критериев локального разрушения металлов при динамических нагружениях, методы идентификации их параметров, а также пути развития этих подходов.

*Ключевые слова:* разрушение, удар, пробивание, эксперимент, моделирование, модели материалов.

### Введение

При постановке и решении задачи о пробивании преграды необходимо учитывать характерный набор геометрических и материальных факторов, присущих большинству нелинейных проблем динамической прочности. Наиболее важными из них являются динамическое упрочнение, температурное разупрочнение, большие пластические деформации, нарушение сплошности материала вследствие локального разрушения, динамически изменяемые контактные границы. В зависимости от скорости протекающих при ударном воздействии процессов динамического деформирования влияние этих факторов различно, что может приводить к существенным упрощениям постановки задачи о пробивании. Наиболее сложным для математического моделирования является диапазон относительно медленных динамических процессов деформирования ( $10^2$ – $10^4$  с<sup>-1</sup>), когда квазистатический, с одной стороны, и гидродинамический, с другой стороны, подходы оказываются неприемлемыми. Из-за сложности адекватной постановки строгие аналитические методы для решения задачи о пробивании не получили существенного развития, и в настоящее время для этой цели преимущественно применяются экспериментальные, полуэмпирические и расчетные методы.

### Компьютерное моделирование пробивания преграды

Наиболее распространенным методом решения задачи о пробивании является прямое трехмерное компьютерное моделирование с использованием некоторого характерного набора физических моделей материального поведения, критериев локального разрушения и контактных алгоритмов. Не будем детально рассматривать особенности выбора определяющих соотношений и задания контактных условий, а сосредоточимся на проблеме выбора наиболее подходящего критерия разрушения. Отметим лишь, что традиционно в расчетах в качестве определяющих соотношений используются различные модификации теории пластического течения с учетом динамических и температурных факторов [1], а на контактных границах принимаются законы сухого и вязкого трения. До недавнего времени в инженерной практике для решения задач пробивания наиболее широко использовался простой деформационный критерий разрушения по максимальной величине интенсивности пластических деформаций. Такой подход дает возможность достаточно точно определять запреградную скорость ударника, но не позволяет описывать некоторые качественные эффекты, возникающие при пробивании металлической преграды, такие как образование

пробки, лепестковый характер разрушения, наличие больших пластических деформаций в окрестности области разрушения. В последние годы при решении такого рода задач все чаще используются критерии, учитывающие зависимость предельной деформации разрушения от вида напряженного состояния. Так, например, в известной модели Джонсона–Кука [2] принимается экспоненциальная зависимость деформации разрушения от параметра вида напряженного состояния, равного отношению гидростатического давления к интенсивности напряжений. С использованием этой модели удастся хорошо описать некоторые из указанных выше качественных явлений. Однако, как показано в [1], зависимость деформаций разрушения от параметра вида напряженного состояния для ряда материалов имеет несколько более сложный характер и является немонотонной. В статьях [1, 3] также показано, что однопараметрическая зависимость такого рода является недостаточной, и при построении критерия разрушения необходимо учитывать влияние третьего инварианта девиатора напряжений. В качестве критерия разрушения предлагается использовать экспериментально определенную поверхность разрушения, построенную по результатам разнородных испытаний, реализующих различные комбинации значений параметра вида напряженного состояния и угла Лоде, который выражается через отношение третьего инварианта девиатора к кубу интенсивности напряжений. Этот подход наиболее интенсивно развивается в настоящее время, однако существенным его недостатком является необходимость проведения многочисленных экспериментов.

Другим важным направлением исследования является использование микроструктурных феноменологических подходов. В работе [4] для описания разрушения металлов при интенсивном нагружении применяется модификация модели Гурсо [5], в которой предполагается, что разрушение конструкции при интенсивных нагрузках происходит за счет зарождения и роста микропустот в объеме материала. В качестве основной характеристики в модели введена функция  $f$ , задающая концентрацию пустот в локальном объеме в каждый момент времени, представленная в виде суммы долей существующих и зарождающихся пустот. При этом рост существующих микропустот определяется изменением объемной пластической деформации, а зарождение новых пустот рассматривается с точки зрения вероятностного подхода и задается при помощи нормального распределения. Локальное разрушение материала наступает при достижении критическо-

го значения функции  $f$ . В качестве дополнительного критерия разрушения на заданном интервале значений параметра вида напряженного состояния используется критерий разрушения Джонсона–Кука. Связь между напряжениями и деформациями определяется по ассоциативному закону с функцией текучести специального вида. На рис. 1 и в таблице приведено сравнение результатов натурных и виртуальных испытаний, реализующих различные виды напряженного состояния. Для задачи пробивания также приводится сравнение различных критериев разрушения.

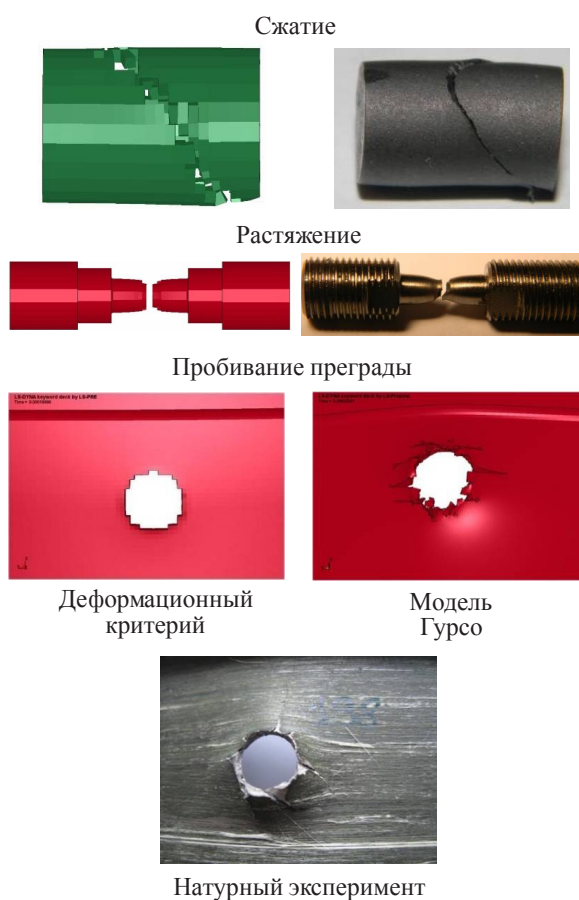


Рис. 1

Натурные испытания проводились сотрудниками лаборатории динамических испытаний НИИМ ННГУ А.М. Браговым, А.Ю. Константиновым, А.К. Ломуновым, В.В. Баландиным и А.Р. Филипповым.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №09-08-01229-а.*

#### Список литературы

1. Carney K.S., DuBois P.A., Buyuk M., Kan S. // Proc. ASCE Earth and Space Conf. Long Beach, CA. 2008.
2. Johnson G.R., Cook W.H. // Engineering Fracture Mechanics. 1985. V. 21, No 1. P. 31–48.

3. Bau Y., Wierzbicki T // International Journal of Mechanical Sciences. 2004. V. 46. P. 81–98. Вып. 1.  
 5. Gurson A.L. // J. Engineering. Mater. Technol.  
 4. Ломакин Е.В. и др. // Вестник ННГУ. 2011. 1977. V. 99. P. 2–15.

Таблица

## Результаты экспериментов на пробивание

№		Скорость ударника, м/с	Остаточная скорость, м/с	Скорость пробки, м/с	Масса пробки, г
1	Натурный эксперимент	290	0	–	0.35
	Деформационный критерий			Нет пробки	
	Модель Гурсо			86	0.3
2	Натурный эксперимент	333	149	240	0.33
	Деформационный критерий		143	Нет пробки	
	Модель Гурсо		146	276	0.35

## ON THE FRACTURE CRITERION OF METALS UNDER DYNAMIC LOADING

P.A. Mossakovskiy, F.K. Antonov, M.E. Kolotnikov, L.A. Kostyreva

One of the most important factors in ensuring the adequacy of the mathematical modeling of limiting states of structures is the choice of the material local fracture criterion and accurate determination of its parameters. The paper discusses some traditional approaches to the construction of local failure criteria of metals under dynamic loading, methods of identification of their parameters, as well as the development of these approaches, using the example of an impact penetration problem.

*Keywords:* failure of metals, impact, penetration, experiment, simulation, material models.