

УДК 531.58

ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНИКОВ БОЛЬШОГО УДЛИНЕНИЯ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПРЕГРАДАМИ ПОД УГЛОМ

© 2011 г.

В.А. Велданов¹, В.С. Козлов²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

²Научно-производственное предприятие «Контур», Москва

vevladi@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Приведены результаты расчетов и экспериментов по высокоскоростному взаимодействию ударников длиной 12.5–30 диаметров с мишенями при различных соотношениях плотностей ударников и мишеней. Расчеты проведены с использованием модифицированной модели Алексеевского – Тейта, учитывающей вязкостные свойства материалов, и с помощью численных методик. Показано, что отличие от прямолинейного движения ударника в преграде начинает интенсивно проявляться при углах встречи от нормали более 75°.

Ключевые слова: проникание, ударник, преграда, металл, вязкость, прочность, угол встречи, траектория, денормализация.

Гидродинамическая модель проникания ударников для скоростей взаимодействия ниже 3000 м/с, учитывающая прочностные свойства материалов ударника и преграды [1, 2], позволяет получать более реалистические оценки параметров проникания по сравнению с классической гидродинамической моделью М.А. Лаврентьева [3], однако удовлетворительного согласования с экспериментом при изменении скоростей деформирования в широком диапазоне не достигнуто. Одной из причин этого может служить отсутствие учета в моделях проникания такого важного свойства материалов, как вязкость.

Для учета вязкостной составляющей сопротивления деформированию при ударе σ_v предлагается воспользоваться зависимостью:

$$\sigma_v = \mu \dot{\epsilon} = \mu V/d, \quad (1)$$

где μ – коэффициент вязкости, $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, V – текущая скорость взаимодействия ударника с преградой, d – диаметр ударника.

Показано [4], что в диапазоне скоростей удара 800–2500 м/с сопротивление, пропорциональное скорости, сопоставимо по величине с инерционным и прочностным сопротивлением и даже может значительно превышать прочностное, не зависящее существенно от скорости удара.

Напряженное состояние в критической точке деформируемого материала ударника и преграды будет определяться суммой инерционной, вязкой и прочностной составляющих:

$$\frac{1}{2} \rho_p (V-U)^2 + \frac{1}{2} \mu_p \dot{\epsilon}_p + \sigma_p =$$

$$= \frac{1}{2} \rho_t U^2 + \frac{1}{2} \mu_t \dot{\epsilon}_t + H_t, \quad (2)$$

где $\rho_p, \mu_p, \dot{\epsilon}_p, \mu_p$ – плотность, вязкость, скорость деформации, динамический предел текучести материала ударника; $\rho_t, \mu_t, \dot{\epsilon}_t, H_t$ – плотность, вязкость, скорость деформации, динамическая твердость материала преграды; V – скорость жесткой части ударника, U – скорость внедрения ударника в преграду.

Для нахождения скоростей деформаций ударника и преграды использованы следующие выражения: $\dot{\epsilon}_p = (V-U)/d$, $\dot{\epsilon}_t = U/d$.

Уравнение (2), уравнения движения жесткой части ударника l , изменения длины ударника, имевшего в момент встречи с преградой длину L , и уравнения изменения глубины проникания H образуют замкнутую систему, позволяющую определить влияние плотности, прочности и вязкости материалов ударника и преграды на основные характеристики проникания [4].

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными по прониканию ударника в полубесконечные преграды показало, что модель с учетом вязкости качественно и количественно верно описывает этот процесс. Экспериментальные данные получены в диапазоне углов встречи от нормали к поверхности преграды от 0 до 70°. Отмечено, что при углах встречи от 0 до 65° длина траектории ударника в преграде не зависит от угла встречи и имеет прямолинейный характер (рис. 1). На рисунке обозначены кривые: 1, 2 – расчет с учетом вязкости, 3 – классическая гид-

родинамическая теория. Отличие от прямолинейного движения начинает проявляться при углах встречи, превышающих 70° (рис. 1, экспериментальные точки при $\alpha = 70^\circ$). Наилучшее совпадение расчета с экспериментом при проникании под углом имеет место в случае, когда плотность ударника в 2–3 раза превышает плотность материала преграды.

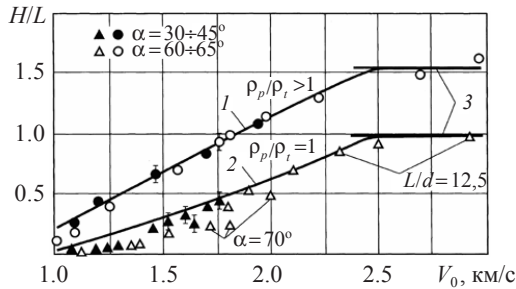


Рис. 1

При скоростях встречи V_0 более 2–2.5 км/с влиянием прочности и вязкости можно пренебречь, основным будет инерционное сопротивление, и поэтому результаты эксперимента довольно точно описываются гидродинамической теорией. Сравнение экспериментальных и расчетных данных проникания ударников равной плотности с материалом преграды показывает, что лучшее согласование наблюдается в диапазоне скоростей свыше 1200 м/с.

При $V_0 < 1200$ м/с расчетные значения H выше, что может отчасти быть объяснено большей тенденцией более легких ударников к денормализации (отклонению от нормали к поверхности преграды) в начальной стадии проникания при малых скоростях встречи.

Расчет проникания методами механики сплошной среды (МСС) отражает экспериментально отмеченный факт незначительного изменения глубины проникания в направлении начальной скорости контакта V_0 в диапазоне углов встречи $\alpha = 0-75^\circ$. И только при больших углах происходит резкое уменьшение глубины, траектория движения ударника в преграде сильно искривля-

ется, вплоть до появления его рикошета от преграды. На рис. 2 показана зависимость, полученная при расчете (МСС) относительной глубины проникания под углом в направлении V_0 при $\rho_p/\rho_t = 2.33$, $L/d = 20$.

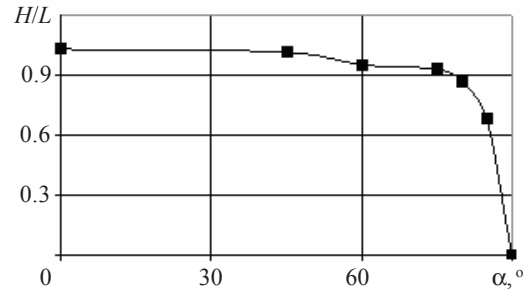


Рис. 2

Что касается глубины образуемой ударником каверны, измеряемой по нормали от поверхности преграды, то расчетом показано, что при углах встречи α в диапазоне $0-60^\circ$ она меньше рассчитанной как произведение глубины проникания при $\alpha = 0$ на $\cos \alpha$ (из-за искривления траектории), а при $\alpha > 60^\circ$ больше (сказывается влияние поперечных размеров каверны).

Работа выполнена при поддержке АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.2/2792) и РФФИ (грант №11-08-01038а).

Список литературы

1. Лаврентьев М.А. Кумулятивный заряд и принципы его работы // Успехи мат. наук. 1957. Т. 21, вып. 4. С. 41–56.
2. Алексеевский В.П. К вопросу о проникании стержня в преграду с большой скоростью // Физика горения и взрыва. 1966. С. 99–106.
3. Тейт А. Теория торможения длинных стержней после удара по мишени // Механика. 1968. №5. С. 125–137; 1970. №2. С. 124–134.
4. Veldanov V.A., Kozlov V.S. Penetration modeling in mind viscosity properties of the impacted body materials // 23st International Symposium on Ballistics. Taragona, Spain. 2007. V. 2. P. 1429–1436.

CHARACTERISTICS OF HIGH-VELOCITY OBLIQUE IMPACT OF PROJECTILES OF LARGE ELONGATION AGAINST METAL TARGETS

V.A. Veldanov, V.S. Kozlov

Results of calculations and experiments on high-velocity impact of rods with the elongation of 12.5–30 d against targets are presented for different projectile-target density ratios. Calculations are carried out according to modified Alexeevsky–Tate model, accounting for material viscous properties, as well as using numerical modeling. It was shown that deviation from straight motion of the target starts to appear at impact angles larger than 75° .

Keywords: penetration, rod, target, metal, viscosity, strength, impact angle, trajectory, denormalization.