

# МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ ДЮРАЛЮМИНИЕВОЙ ПРЕГРАДЫ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАКРОЧАСТИЦ, УСКОРЕННЫХ КОМБИНИРОВАННОЙ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ УСТАНОВКОЙ

В.В. Асташинский, М.И. Богач, А.В. Бурачевский  
Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь, [astashynski@bsu.by](mailto:astashynski@bsu.by)

В работе представлена физико-математическая модель воздействия частицы диаметром 4 мм из подшипниковой стали, движущейся со скоростью более 4 км/с, на дюралюминиевую мишень толщиной 8 мм. Частица была ускорена с помощью двухступенчатой комбинированной газоразрядной установки. Показано, что в процессе соударения в мишени будут возникать поля упругих напряжений как сжатия, так и растяжения. В результате моделирования пробоя мишени получены размеры и форма кратера, которые находятся в хорошем соответствии с экспериментально наблюдаемыми результатами. Разработанная модель также позволяет исследовать упругие напряжения в материалах, подвергнутых воздействию концентрированных потоков энергии.

## Введение

Изучение высокоскоростного соударения твердых тел и сопутствующих явлений приобретает в настоящее время особую значимость, что связано не только с традиционными сферами приложений данной проблемы (противометеоритная защита космических аппаратов, безопасность работы ядерных реакторов и т.п.), но и с появлением целого ряда новых технологических процессов, таких как упрочнение материалов методами высокоэнергетического воздействия, ударное прессование порошковых материалов, а также синтез новых композитных покрытий [1-4].

Последнее десятилетие активно создаются и исследуются различные установки для ускорения микро- и макрочастиц, различающиеся как по принципам работы, так и по размерам и массам ускоряемых тел [1, 2]. Данное разнообразие объясняется необходимостью получения скоростей в широком диапазоне, чего невозможно добиться, используя лишь один тип разгонного устройства.

Существенного улучшения характеристик металловых установок можно достичь, используя различные комбинированные схемы, например, с помощью двухстадийной легкогазовой пушки, созданной в ИТМО НАН Беларуси [5], в которой коаксиальный плазменный ускоритель формирует плазменный поток, создающий ударную волну в канале высокого давления. Далее происходит разгон ускоряемой частицы за счет энергии сжатого и нагретого под действием ударной волны легкого газа.

Предварительные эксперименты, проведенные с такой комбинированной газоразрядной установкой, показали, что метаема частица диаметром 4 мм из подшипниковой стали разогналась до скорости, превышающей 4 км/с, и пробивала дюралюминиевую мишень толщиной 8 мм. При этом наблюдалось разрушение фронтальной поверхности с образованием центрально-симметричной кольцевой воронки диаметром, превышающем диаметр ударника [5]. В дальнейшем планируется использование созданной двухстадийной пушки в экспериментах по ударному прессованию порошковых материалов. Однако,

как видно из результатов подобных исследований [3-4], для обоснованного выбора оптимальных рабочих режимов таких устройств необходима достаточная полная информация о физических процессах в таких системах, которая может быть получена методами физико-математического моделирования.

Целью данной работы является создание физико-математической модели, описывающей динамику воздействия стальной макрочастицы снаряда, ускоренного комбинированной газоразрядной установкой, на дюралюминиевую преграду. Разрабатываемая модель может быть полезна при создании нового метода получения композитных покрытий, основанного на ударном прессовании порошковых материалов.

## Построение модели

Известно, что при воздействии на мишень снарядами со сверхвысокими скоростями (более 4 км/с) характерные времена нагружения и реакции имеют порядок долей микросекунд [6]. Кроме того, при использовании стального снаряда и дюралюминиевой преграды, локальное давление, оказываемое ударником на поверхность мишени, на порядок превышает пределы прочности ее материала. Поэтому при моделировании динамики воздействия можно пренебречь кристаллической структурой мишени и рассматривать ее как аморфное тело. Подобные упрощения позволяют создать модель взаимодействия снаряда с преградой методом дискретных элементов [7]. Данный метод представляет собой замену исследуемой системы совокупностью частиц, движения которых подчиняются законам механики с учетом заданных законов взаимодействия. Несомненным преимуществом этого метода является то, что он требует значительно меньше априорных предположений о свойствах материала, нежели методы, основанные на механике сплошных сред. Еще одно упрощение, сделанное в разработанной модели, – пренебрежение сжимаемостью снаряда. В этом случае его взаимодействия с частицами считаются абсолютно упругими, что позволяет использовать упрощенные алгоритмы расчета

параметров столкновений.

Таким образом, модель преграды представляет собой совокупность из  $N$  взаимодействующих материальных точек, между которыми установлены связи типа Кельвина-Фойгта [8], причем частицы размещены в узлах ГПУ решетки. Такая конфигурация гарантирует, что между каждой парой частиц соблюдено равновесное расстояние. В этом случае уравнения движения частиц:

$$m\ddot{\mathbf{r}}_i = \sum_{j=1}^N \Phi(r_{ij})\mathbf{r}_{ij} + \sum_{j=1}^N \Psi(r_{ij}, v_{ij})\mathbf{r}_{ij}$$

можно разделить на два слагаемых, отвечающих за консервативную составляющую взаимодействия  $\Phi$  и неконсервативную составляющую  $\Psi$ . В качестве консервативного слагаемого был выбран четырехпараметрический потенциал Ми [9]:

$$\Phi(r) = -\frac{1}{r}\Pi'(r),$$

$$\Pi(r) = \frac{D}{k-l} \left[ l \left( \frac{a}{r} \right)^k - k \left( \frac{a}{r} \right)^l \right],$$

что обеспечило большую свободу в подборе параметров при проведении вычислительного эксперимента. Дополнительное условие короткодействия данного потенциала позволило ограничить вычисление сил, действующих на произвольную частицу, исключительно ее ближайшим окружением. Неконсервативное линейное слагаемое  $\Psi$  введено для отвода избыточной энергии из системы.

В качестве основных параметров моделирования были заданы масса частиц  $m$ , равновесное расстояние между ними  $a$  и характерный масштаб времени  $T$ . Масса частиц определена естественным образом как масса образца  $M$ , деленная на количество частиц:

$$m = \frac{M}{N}.$$

Равновесное расстояние вычисляется из объема, приходящегося на одну элементарную ячейку:

$$V = V_0(\chi a)^d N,$$

а в качестве единицы характерного времени взят период малых гармонических колебаний частиц около равновесных положений:

$$T = 2\pi\sqrt{m/\gamma}.$$

Параметры потенциала взаимодействия были заданы исходя из плотности дюралюминия  $2790 \text{ кг/м}^3$  и его модуля Юнга  $74 \text{ ГПа}$  [10].

### Вычислительный эксперимент

Для численного расчета уравнений движения частиц был использован метод Дормана-Принса с адаптивной настройкой шага интегрирования. Выбор данного метода обусловлен тем, что в рамках рассматриваемой задачи он позволяет достигнуть приемлемой погрешности пространственных вычислений (порядка 0,1% в масштабе равновесного расстояния  $a$ ) при использовании достаточно крупных шагов по модельному времени (порядка 0,01-0,001  $T$ ).

В качестве тестовых экспериментов было

проведено моделирование воздействия снарядом на полубесконечную мишень. Расчеты с параметрами системы, накладывающими различные ограничения на потенциал, не продемонстрировали существенного изменения результатов, кроме очевидного влияния на производительность программы. Оптимизация вычислений в процессе программной реализации была достигнута за счет максимально допустимой в рамках алгоритма прямой работы с памятью и ограничением на работу с жестким носителем рассчитанных данных, модельное время между которыми меньше максимально допустимого шага интегрирования.

Как следует из расчетов, результаты которых представлены на рис. 1, при попадании снаряда на мишень перпендикулярно ее поверхности в материале начинает развиваться двумерное напряженное состояние.

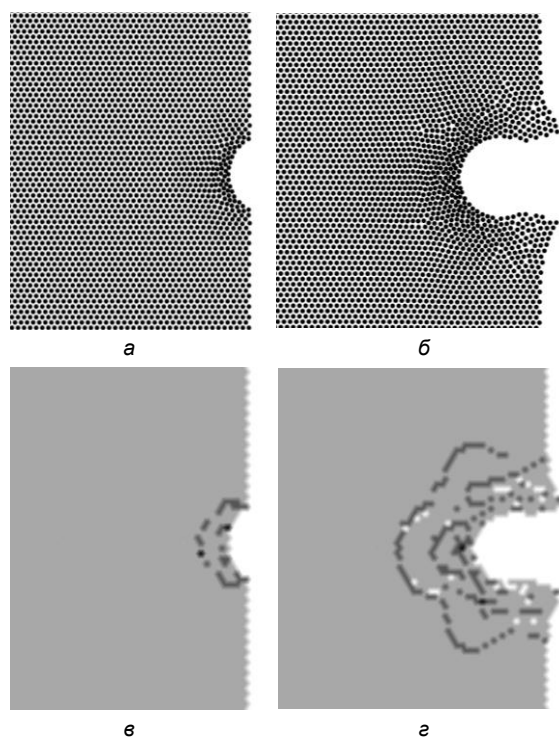


Рис. 1. Распространение упругих волн в мишени при попадании снаряда перпендикулярно ее поверхности: а, б – двумерное сечение модели; в, г – волны сжатия (темные кривые) в плоскости сечения.

Также установлено, что при ударе под углом в результате асимметричного нагружения возникают напряжения изгиба (рис. 2).

Существенным отличием процессов взаимодействия снаряда с мишенями конечной толщины является то, что при образовании кратера в преграде толщиной, сравнимой с диаметром ударника, ударная волна, возникающая в материале мишени, успевает дойти до задней свободной поверхности и отразится от нее, вызывая волну растяжения, распространяющуюся в обратном направлении (рис. 3). Подобные упругие поля способствуют генерации дислокаций в приповерхностном слое.

Полученные при моделировании пробы пре-

градусы размеры и форма образовавшегося кратера находятся в хорошем соответствии с экспериментально наблюдаемыми результатами [5].

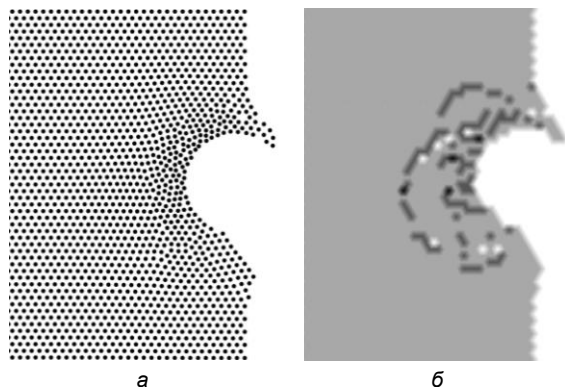


Рис. 2. Формирование напряжений изгиба в мишени при попадании снаряда под углом к ее поверхности: а – двумерное сечение модели; б – волны сжатия (темные кривые) в плоскости сечения.

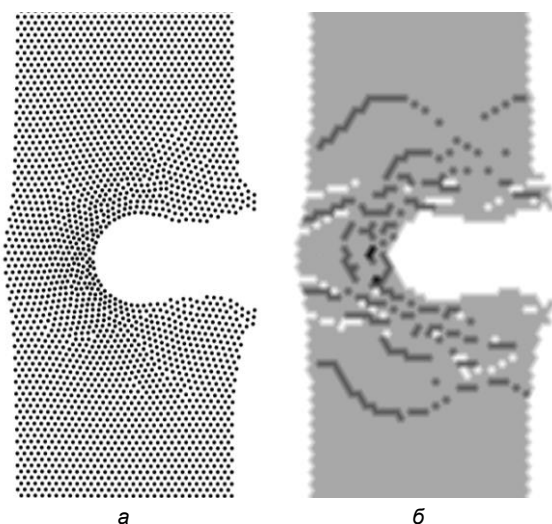


Рис. 3. Отражение упругих волн от задней свободной поверхности мишени при попадании снаряда перпендикулярно ее поверхности: а – двумерное сечение модели; б – волны сжатия (темные кривые) и растяжения (светлые кривые) в плоскости сечения.

## Заключение

Анализ воздействия снаряда на дюралюминиевую преграду показывает, что в процессе соударения в мишени будут возникать поля упругих напряжений как сжатия, так и растяжения, которые способствуют генерации дислокаций в приповерхностном слое. Процесс воздействия абсолютно твердого снаряда с мягкой преградой можно разделить на три стадии. На начальной стадии проникновения снаряда в поверхность происходят деформации сжатия с образованием в материале ударных волн. По мере продвижения снаряда в материале наблюдается формирование «пробки» и развитие узких полос интенсивного сдвига. На заключительной стадии взаимодействия наблюдается движение снаряда и пробки как единого целого.

Дальнейшая оптимизация вычислительного алгоритма может быть достигнута путем применения распределенных вычислений.

## Список литературы

1. Зоненко С.И., Черный Г.Г. // Доклады РАН. 2003. Т. 390. № 1. С. 46-50.
2. Bazylev B., Janeschitz G., Landman I., et al. // Physica Scripta. 2007. V. 128. P. 229-233.
3. Wang Bingfeng, Xie F., Wang Bin, et al. // Materials Science and Engineering C. 2015. V. 50. P. 324-331.
4. Khoei A.R., Biabanaki S.O.R., Parvaneh S.M. // Applied Mathematical Modelling. 2013. V. 37. P. 443-462.
5. Храмов П.П., Пенязьков О.Г., Васецкий В.А. и др. // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 4. Принята в печать.
6. Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф. и др. Динамика удара. М.: Мир, 1985. 296 с.
7. Кривцов А.М., Кривцова Н.В. // Дальневосточный математический журнал ДВО РАН. 2002. Т. 3, № 2. С. 254-276.
8. Meyers M.A., Chawla K.K. Mechanical Behavior of Materials. NJ: Prentice Hall, 1998. 680 p.
9. Erkos S. // Physics Reports. 1997. V. 278. № 2. P. 80-105.
10. Хэтч Дж.Е. Алюминий: свойства и физическое металловедение. М.: Металлургия, 1989. 422 с.

## MODELING OF ELASTIC STRESS FIELDS IN THE DURALUMINIUM TARGET, WHICH ARE ARISING DUE TO THE IMPACT OF MACROPARTICLES ACCELERATED BY THE COMBINED GAS DISCHARGE FACILITY

V.V. Astashynski, M.I. Bogach, A.V. Buracheuski  
Belarusian State University,

4 Nezalezhnasti Ave., Minsk, 220030, Belarus, astashynski@bsu.by

The physical and mathematical model of the impact of steel ball with duralumin target was created. The diameter of steel ball is 4 mm. The thickness of a duralumin target is 8 mm. The particle was accelerated to the speed of more than 4 km/s using a two-stage combined gas discharge facility. It was shown that the collision forms fields of elastic stress both compression and tension in the target. As a result of the target breakdown simulation was obtained the size and shape of the crater which are in good agreement with the experimental results. The results of simulation show that the impact of the absolutely solid particle on the soft barrier can be divided into three stages. At the initial stage of the particle penetration into the surface compressive stresses were occurring in the material and shock waves were forming. Then the formation of "plug" and the development of narrow bands of intense shear were observed. The motion of the both steel ball and plug as a whole was observed at the final stage of interaction.