

УДК 621.762

**О.В. Михайлов, Е.В. Картузов***Институт проблем материаловедения НАН Украины***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗАЩИТНУЮ  
КОНСТРУКЦИЮ, С АМОРТИЗИРУЮЩИМ СЛОЕМ ИЗ ГРАНУЛ ПЕНОАЛЮМИНИЯ**

*Моделируется процесс ударного нагружения защитной конструкции с амортизирующим слоем из гранул пеноалюминия. Использован комбинированный метод, сочетающий континуальный и дискретный подходы. Установлено, что на динамическую реакцию защитного слоя влияют начальная пористость частиц и условия трения между ними. Отсутствие трения между пористыми частицами приводит к интенсификации уплотнения материала в направлении, перпендикулярном воздействию ударника.*

*Ключевые слова:* ударное нагружение, пеногранулы, динамическая реакция, компьютерное моделирование.

**О.В. Михайлов, Е.В. Картузов****МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УДАРНОГО ВПЛИВУ НА ЗАХИСНУ  
КОНСТРУКЦІЮ, ЩО МІСТИТЬ АМОРТИЗУЮЧИЙ ШАР З ГРАНУЛ СПІНЕНОГО  
АЛЮМІНІЮ**

*Моделюється процес ударного навантаження захисної конструкції з амортизуючим шаром з гранул спіненого алюмінію. Використаний комбінований метод, що поєднує континуальний і дискретний підходи. Встановлено, що на динамічну реакцію захисного шару впливають початкова пористість частинок і умови тертя між ними. Відсутність тертя між пористими частинками призводить до інтенсифікації ущільнення матеріалу в напрямку, перпендикулярному дії ударника.*

*Ключові слова:* ударне навантаження, спінені гранули, динамічна реакція, комп'ютерне моделювання.

**O. V. Mikhailov, E. V. Kartuzov****SIMULATION OF THE PROCESS OF IMPACT ON THE PROTECTIVE  
CONSTRUCTION WITH SHOCK-ABSORBING LAYER FROM AL FOAM GRANULES**

*Process of impact loading of protective construction with shock-absorbing layer from Al foam granules is considered. Combined method conjoining continuum and discrete approaches is employed. It is found out that particles' initial porosity and friction conditions among those particles affect on dynamic response of protective layer. Absence of friction among porous particles brings material densification to intensification in the direction perpendicular to projectile's impact.*

*Keywords:* impact loading, foam granules, dynamic reaction, computer modeling.

**Введение.** Металлические вспененные материалы применяются в качестве защитных элементов при динамическом воздействии. Они характеризуются наличием большой пористости и способностью поглощать значительное количество энергии при ударе. Одним из перспективных материалов такого класса является вспененный алюминий.

Форма защитных элементов и соединение между ними могут быть различными. Как правило, применяют элементы, имеющие призматическую форму. В то же время, проводятся исследования по возможности использовать элементов сферической формы. В связи с этим, исследование особенностей поведения защитных конструкций, содержащих такие элементы, является актуальным.

**Постановка задачи и методика моделирования.** Рассмотрен процесс ударного воздействия на защитную конструкцию, содержащую слой из большого количества пористых частиц сферической формы.

Расчетная схема ударного воздействия приведена на рис.1. Защитная конструкция состоит из двух стальных пластин, между которыми помещены частицы из вспененного алюминия. Слева и справа пластины жестко закреплены. Горизонтальное перемещение частиц ограничено боковыми стенками. Динамическое воздействие осуществляется стальным ударником, движущимся в вертикальном направлении. Скорость ударника равнялась 870 м/с.

Рассматривали влияние на динамическую реакцию защитной конструкции двух параметров: начальной внутренней пористости частиц и величины контактного трения между ними. Начальная пористость частиц принимала значения 0.2, 0.5 и 0.7. Коэффициент трения по Кулону равнялся 0.3 и 0 (отсутствие трения).

Для возможности сравнить характер уплотнения пористого материала в различных областях защитного слоя полагали, что начальная пористость всех частиц одинакова. Кроме того, рассматривали регулярную упаковку частиц.

Слой из пеноалюминия представляет собой бипористую среду. Он характеризуется пористостью, обусловленной пространством между частицами, а также внутренней пористостью самих частиц. Моделирование процессов деформирования бипористых материалов имеет ряд особенностей. С одной стороны, необходимо рассматривать процессы деформирования пористых частиц. С другой стороны – необходимо учитывать взаимодействие этих частиц между собой.

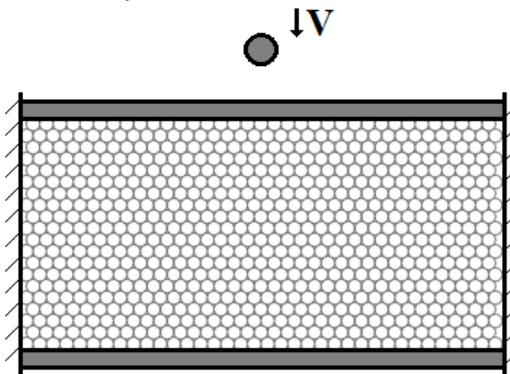


Рис. 1. Расчетная схема ударного воздействия

При моделировании процессов деформирования бипористых материалов использован комбинированный метод моделирования, сочетающий континуальный и дискретный подходы [1-4]. Поведение материала защитного слоя рассматривается на двух масштабных уровнях. Деформирование каждой пористой частички рассматривается в рамках континуального подхода. Используются соотношения теории пластичности пористого тела [5] и метод конечных элементов. Защитный слой в целом рассматривается как совокупность большого количества таких объектов, взаимодействующих друг с другом при наличии контактного трения (рис.2).

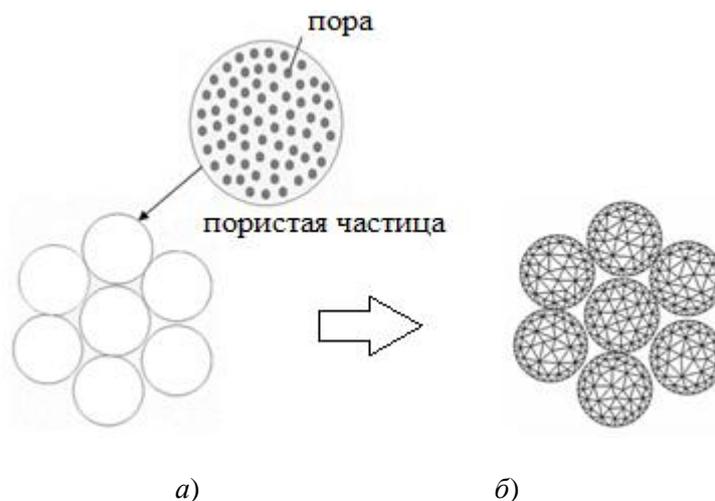


Рис. 2. К построению расчетной модели:

**а – совокупность пористых частиц; б - совокупность конечно- элементных моделей частиц**

В связи с необходимостью проведения большого количества трудоемких и длительных вычислений рассматривали двухмерную постановку задачи (плоско-деформированное состояние, форма частиц пеноалюминия и ударника - цилиндрическая).

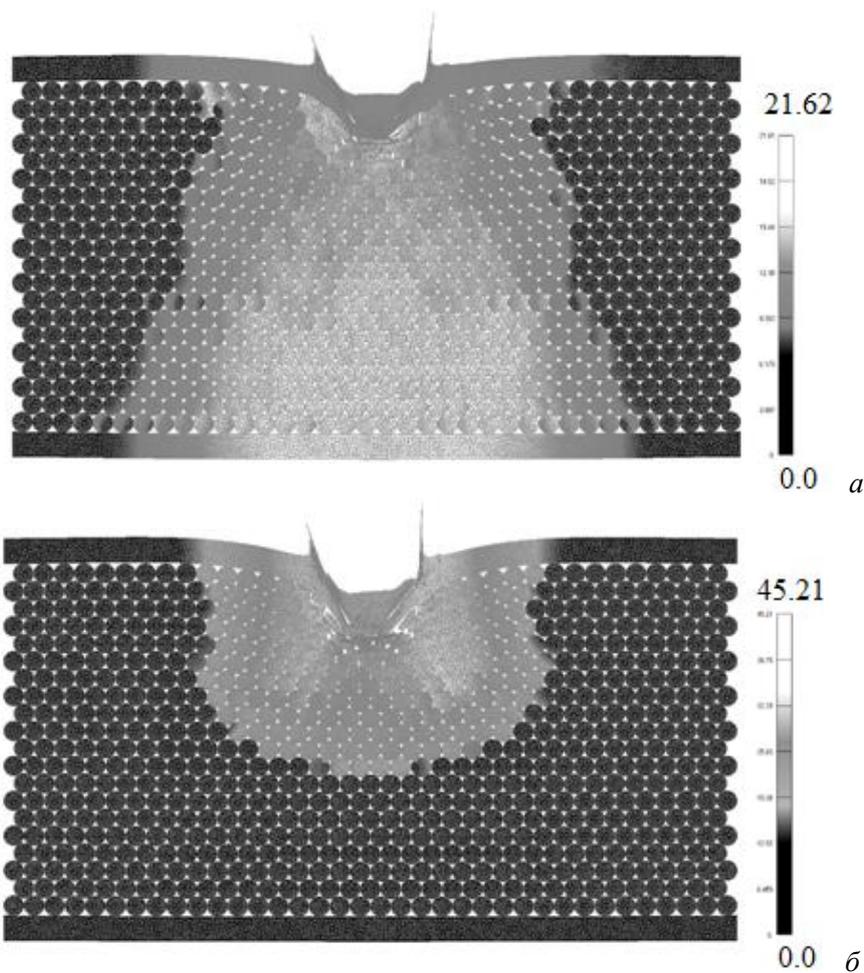
**Результаты моделирования.** На рис.3 приведено распределение величины скорости перемещения материала защитной конструкции и ударника. Начальная внутренняя пористость частиц пеноалюминия равнялась 0.2 и 0.5. Текущее время ударного воздействия в обоих случаях было одинаковое.

При меньшей начальной пористости частиц (равна 0.2) сопротивление защитной конструкции ударному воздействию возрастает (рис.3,а). Ударник проник на меньшую глубину. Скорость его перемещения значительно уменьшилась (до 21.62 м/с). В то же время, перемещение

материала распространяется на всю глубину слоя из пеноалюминия и доходит до нижней стальной пластины, что приводит к ее деформированию.

При увеличении начальной пористости частиц (равна 0.5) ударник глубже проник в защитную конструкцию (рис.3,б), Скорость перемещения ударника уменьшилась менее значительно (до 45.21 м/с). В то же время, перемещение материала пеноалюминия происходит только в верхней части защитного слоя. Нижняя часть защитной конструкции практически неподвижна.

Анализ эквивалентных напряжений, возникающих в защитной конструкции, свидетельствует, что при уменьшении начальной пористости частиц силовое воздействие на нижнюю стальную пластину возрастает.



**Рис. 3. Распределение величины скорости перемещения материала защитной конструкции и ударника, м/с: а - начальная пористость частиц равнялась 0.2; б - 0.5**

Таким образом, с одной стороны, уменьшение начальной пористости частиц приводит к повышению сопротивляемости защитной конструкции, но при этом ударное воздействие через нее передается (что нежелательно).

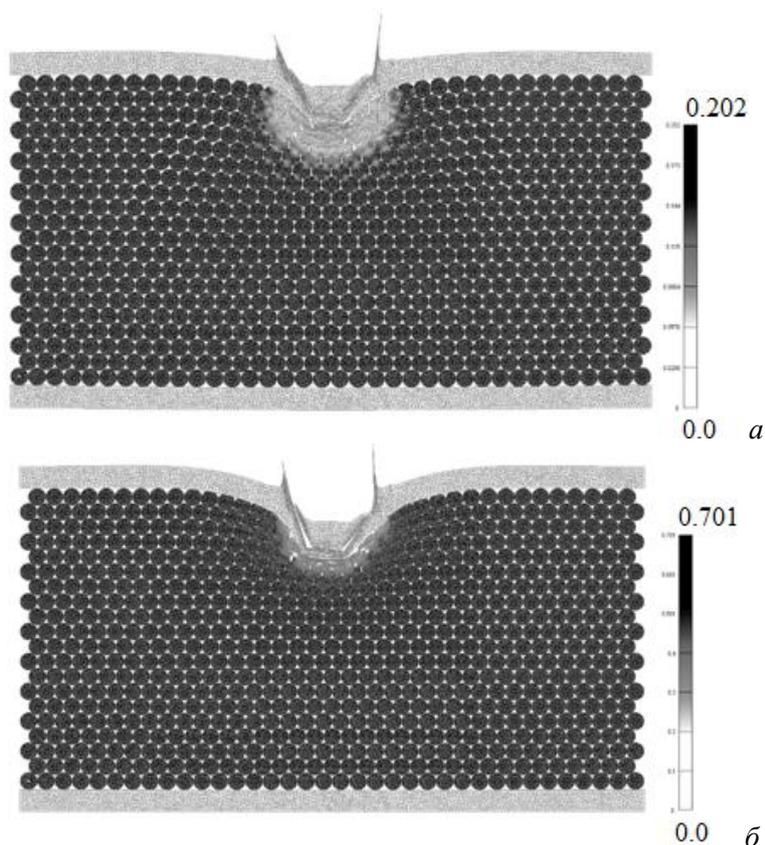
С другой стороны - увеличение начальной пористости предотвращает передачу ударного воздействия через защитную конструкцию. Перемещение материала происходит только в верхней части защитного пористого слоя. Однако в этом случае торможение ударника происходит менее интенсивно, и, при определенных условиях, слой пеноалюминия не позволит обеспечить достаточное поглощение энергии удара, что может привести к разрушению защитной конструкции.

Указанные факторы необходимо учитывать при выборе начальной пористости частиц защитного слоя. Она должна принимать промежуточные, компромиссные значения.

На рис.4 приведено распределение величины пористости частиц после удара. Рассмотрено влияние начальной пористости на характер уплотнения. Начальная пористость частиц равнялась 0.2 и 0.7.

Если пористость частиц мала, то процесс уплотнения захватывает большее количество частиц (рис.4,а). В то же время, частицы уплотняются незначительно и передают воздействие в направлении удара.

Если пористость частиц велика, то процесс уплотнения захватывает меньшее количество частиц (рис.4,б), в которых происходит интенсивное уплотнение, приводящее к значительному поглощению энергии удара. Область ударного воздействия распространяется на меньшую глубину защитного слоя.

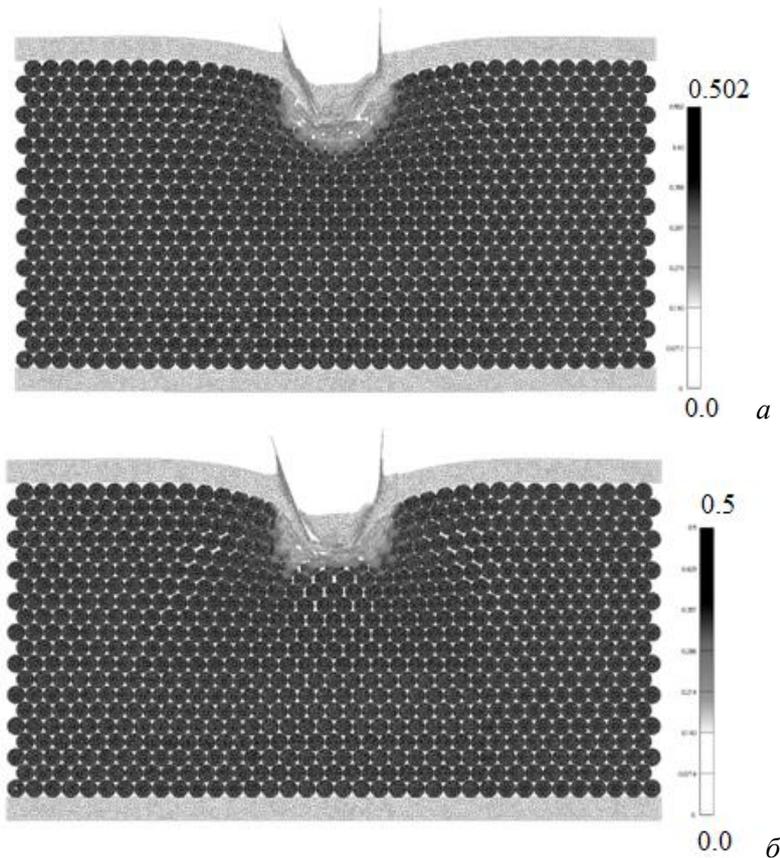


**Рис. 4. Распределение пористости частиц после удара - влияние начальной пористости: а - начальная пористость частиц равнялась 0.2; б - 0.7**

Условия контактного трения между частицами пеноалюминия оказывают влияние на их уплотнение при ударном воздействии. На рис. 5 приведены данные по распределению пористости частиц после удара, которые иллюстрируют это влияние. Начальная пористость частиц равнялась 0.5. Условия трения отличались.

Если трение между частицами существенно (коэффициент трения равен 0.3), то уплотнение частиц происходит непосредственно под ударником (рис.5,а).

Отсутствие трения (коэффициент трения равен 0) приводит к интенсификации уплотнения материала в направлении, перпендикулярном воздействию ударника (рис.5,б). В этой области возрастает скорость горизонтального перемещения материала частиц. Эквивалентные напряжения, возникающие в нижней стальной пластине, с уменьшением коэффициента трения между частицами также уменьшаются.



**Рис.5. Распределение пористости частиц после удара - влияние трения между частицами:  
а - коэффициент трения равнялся 0.3; б - 0.0**

#### **Заклучение.**

Динамическая реакция защитного слоя, состоящего из частиц вспененного алюминия, зависит от двух рассмотренных параметров: величины начальной пористости частиц и условий трения между ними. Меняя значения этих параметров, можно оптимизировать свойства создаваемых защитных конструкций.

#### **Список источников литературы**

1. Михайлов О.В. Особливості розподілу густини при пресуванні агломерованих нано-порошкових систем / О.В. Михайлов, А.Л. Максименко, М.Б. Штерн // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник (за напрямом "Інженерна механіка"), Випуск 20. - Луцьк, травень 2007. - С. 305-310.
2. Mikhailov O.V. Peculiarities of density distribution during pressing of agglomerated nano-powder systems / O.V.Mikhailov, M.B.Shtern, A.L.Maximenko // Modern technologies of ceramic materials and their investigation, Polish Ceramic Bulletin, CERAMICS, Vol.101, 2008, Poland, Krakow, P. 49-56.
3. Михайлов О.В. Моделирование уплотнения бипористых порошковых изделий, имеющих наклонные к направлению прессования поверхности матрице // Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении - Киев: ИПМ им.И.Н.Францевича НАН Украины, 2011, № 13 - С. 90-95
4. Михайлов О.В. Влияние схемы уплотнения на распределение остаточной пористости и характер деформирования частиц при прессовании бипористых порошковых сред в жесткой матрице // Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении - Киев: ИПМ им.И.Н.Францевича НАН Украины, 2012, № 14 - С. 92-98
5. Штерн М.Б., Михайлов О.В. Модифицированные модели деформирования порошковых материалов на основе пластичных и труднодеформируемых порошков // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія Машинобудування. – № 62. – 2011. - С. 13-19

Стаття надійшла до редакції 25.04.2016.