

УДК 539.3

## ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ДЖОНСОНА-КУКА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ АЛЮМИНИЯ

В.А. Кузькин<sup>1</sup>, Д.С. Михалюк<sup>2</sup><sup>1</sup>*Институт проблем машиноведения РАН, С.-Петербург, Россия*<sup>2</sup>*С.-Петербургский государственный политехнический университет, НИИ материалов и технологий,  
С.-Петербург, Россия*

Рассматривается проблема идентификации параметров модели материала Джонсона–Кука с уравнением состояния Ми–Грюнайзена. Проводится конечно-элементное моделирование высокоскоростного ударного взаимодействия двух алюминиевых пластин с помощью программной системы LS-DYNA. В ходе моделирования определяется зависимость скорости свободной поверхности мишени от времени. Исследуется влияние на данную зависимость ряда параметров материала – коэффициента наклона ударной адиабаты, упрочнения, вязкости. Параметры выбираются из условия наилучшего соответствия известным экспериментальным данным. В результате достигается практически полное соответствие результатов численного моделирования и эксперимента.

*Ключевые слова:* метод конечных элементов, откол, модель Джонсона–Кука, уравнение состояния Ми–Грюнайзена, разрушение

## APPLICATION OF NUMERICAL SIMULATION FOR IDENTIFICATION OF JOHNSON-COOK MATERIAL MODEL PARAMETERS FOR ALUMINUM UNDER HIGH-SPEED LOADING

V.A. Kuzkin<sup>1</sup> and D.S. Mihaluk<sup>2</sup><sup>1</sup>*Institute for Problems in Mechanical Engineering RAS, St.-Petersburg, Russia*<sup>2</sup>*St.-Petersburg State Polytechnical University, Research Institute of Materials and Technology,  
St.-Petersburg, Russia*

The problem of identification of the parameters of the Johnson–Cook material model with the Mie–Grüneisen equation of state (EOS) is studied. Finite element modeling of high-speed impact of two aluminum plates is carried out using the LS-DYNA code. The time-dependence of the free surface velocity of the target is obtained. The influence of material parameters (percussive adiabat slope, hardening, viscosity) on this dependence is investigated. The parameters are chosen so that they fit the known experimental data. Very good agreement between experimental and numerical results is achieved.

*Keywords:* finite element method, spall, Johnson–Cook model, Mie–Grüneisen EOS, fracture

### 1. Введение

В силу сложности процессов, происходящих в конденсированном веществе при высокоскоростном деформировании [1], их исследование методами механики сплошной среды базируется на сложных моделях материала, содержащих большое количество параметров [2, 3]. В частности, на практике широко используется модель Джонсона–Кука [4]. Данная модель учитывает зависимость предела текучести от температуры, скорости деформирования и накопленной пластической деформации. Прямое

экспериментальное определение параметров модели представляет собой сложную, не решенную до конца задачу. В литературе встречаются данные лишь для ограниченного круга материалов [5–8], при этом параметры одного материала, взятые из разных источников, могут различаться весьма значительно. В подобной ситуации определять параметры модели на деле приходится из условия наилучшего совпадения с известными экспериментальными данными.

Одним из наиболее распространенных методов исследования поведения материала при динамических нагрузках является метод откола [1–3]. В рамках данного подхода механические свойства материала определяются по результатам измерений скорости свободной поверхности мишени — пластины, подверженной ударно-волновому нагружению. Существует ряд аналитических выражений, связывающих измеряемые величины с параметрами материала [1, 3]. Однако они, как правило, носят приближенный характер и не дают полной информации, необходимой для идентификации параметров модели. Большие возможности дает численное моделирование, например, методом конечных элементов [9]. Современные пакеты конечно-элементного анализа, такие как ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS и другие, позволяют решать задачи механики сплошных сред со сложными определяющими соотношениями. Варьирование закладываемых в расчет параметров материала дает возможность получения их связи с измеряемыми в эксперименте величинами.

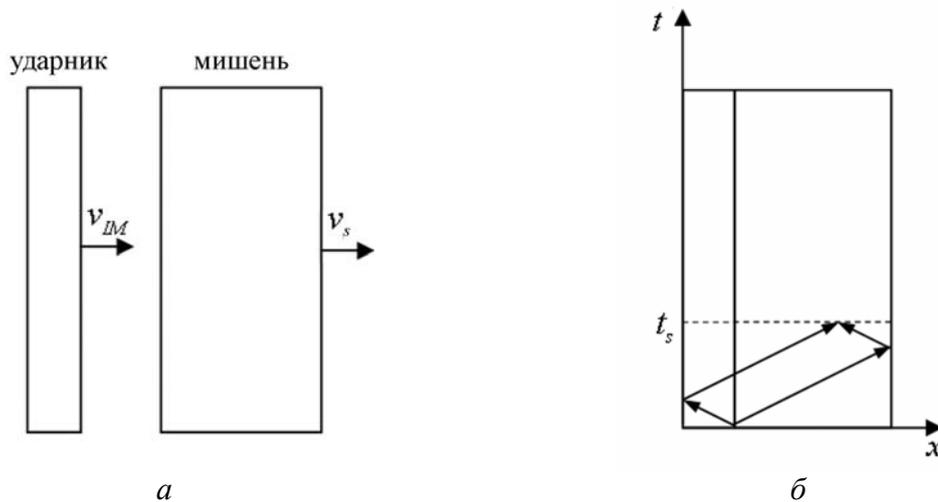
В данной работе проводится численное моделирование эксперимента по соударению пластин из монокристаллического алюминия. Для этого используется метод конечных элементов, реализованный в пакете прикладных программ LS-DYNA. В качестве модели материала принимается модель Джонсона–Кука с уравнением состояния в форме Ми–Грюнайзена [10]. В процессе расчета определяется скорость свободной поверхности мишени. Исследуется влияние параметров материала на данную величину. Проводится сравнение с экспериментальными данными, приведенными в монографии [11].

## 2. Определение свойств материала по измерениям скорости свободной поверхности

Опираясь на результаты, приведенные в работах [1, 3], определим качественное влияние параметров материала на величины, измеряемые в эксперименте. Для исследования поведения материала при высокоскоростном деформировании воспользуемся методом откола. Суть метода состоит в генерации в пластине из исследуемого материала ударных волн сжатия и разряжения. Схематично этапы эксперимента показаны на рисунке 1.

Основным измеряемым параметром является скорость свободной поверхности мишени [1, 2]. Форма данной зависимости для разных материалов может существенно различаться [11], однако можно выделить некоторые общие черты. Типичная зависимость для упруго-пластического материала приведена на рисунке 2. Поясним смысл изображенных величин  $A_1$  и установим их связь с параметрами материала. Итак,  $A_1$  — это время, за которое упругая волна проходит через мишень. Очевидно, что  $A_1 = h_T / v_l$ , где  $h_T$  — толщина мишени,  $v_l$  — скорость распространения продольных волн. Величина  $A_2$  — это амплитуда упругого предвестника. Для не слишком больших скоростей соударения она определяется по следующей формуле [2]:

$$A_2 = 2 \frac{(1-\mu)\sigma_Y}{(1-2\mu)\rho_0 v_l},$$



**Рис. 1.** Образцы до соударения (а) ( $v_{IM}$  – скорость ударника,  $v_s$  – скорость свободной поверхности мишени) и упрощенная  $x$ – $t$  диаграмма до момента откола  $t_s$  (б)

где  $\sigma_Y$  — предел текучести,  $\mu$  — коэффициент Пуассона,  $\rho_0$  — плотность в недеформированном состоянии. Величина  $A_3$  — время между выходом упругой и пластической волн на свободную поверхность, которое определяется скоростями упомянутых волн, а также толщиной мишени. Величина  $A_4$  — ширина пластического фронта, зависящая от скорости пластической волны и толщины ударника. Величина  $A_5$  есть амплитуда пластического фронта. В зависимости от соотношения скоростей упругой и пластической волн, а также толщин ударника и мишени возможно двойное поведение волны нагружения. Допустим, что параметры образцов такие, что упругая волна разгрузки, идущая от свободной поверхности ударника, не успевает догнать пластический фронт до того, как он достигнет свободной поверхности. Такая ситуация изображена на рисунке 2, и ей соответствует ярко выраженный максимум на графике зависимости  $v_s(t)$ . В противном случае максимум полностью срезается волной разгрузки. Далее будет показано, что приведенные рассуждения полностью согласуются с результатами моделирования. Экспериментально установлено [11], что для величин  $A_2, A_5$  всегда выполняется соотношение:

$$A_5 \leq v_{IM} - A_2.$$

Данный факт объясняется затуханием пластического фронта при прохождении через образец. Затухание, в основном, обусловлено совершением пластической работы. Величину  $A_6$  часто считают пропорциональной величине разрушающих напряжений (так называемой откольной прочности материала) [3]. И последняя величина —  $A_7$ , есть скорость откольной тарелки, зависящая от скорости ударника, а также энергии, затрачиваемой на разрушение.

Таким образом, измерение скорости свободной поверхности дает информацию об упругих, пластических и прочностных характеристиках исследуемого материала, а также о его уравнении состояния. Однако в большинстве случаев нет строгой формулы, связывающей параметры экспериментальной кривой с параметрами материала. В такой ситуации незаменимую роль играет компьютерное моделирование, позволяющее напрямую исследовать влияние параметров материала на измеряемые в эксперименте величины.

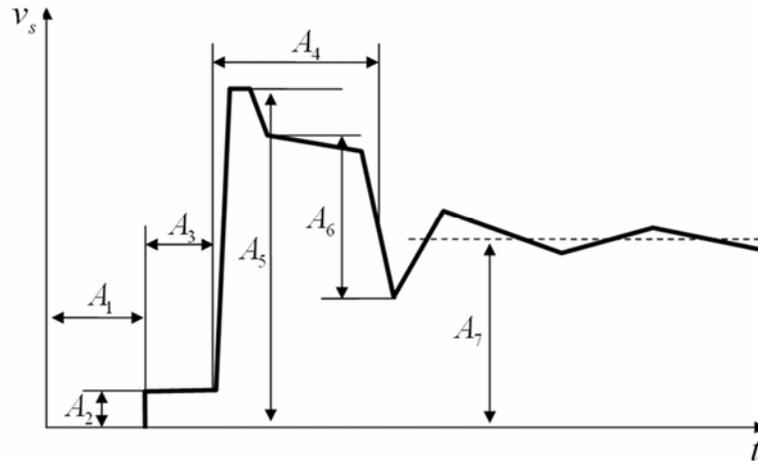


Рис. 2. Схематическая зависимость скорости свободной поверхности от времени для упруго-пластического материала [2]

### 3. Моделирование методом конечных элементов

#### 3.1. Построение конечно-элементной модели

Проведем численное моделирование соударения пластин из монокристаллического алюминия. Экспериментальные результаты исследования этого процесса приведены в работе [11]. В эксперименте измерялась зависимость скорости свободной поверхности мишени от времени. Для моделирования воспользуемся пакетом конечно-элементного анализа LS-DYNA [10], отличительной особенностью которого является наличие решателя, основанного на применении явной схемы интегрирования по времени. При моделировании быстро протекающих нелинейных процессов явная схема является более предпочтительной в сравнении с неявной [13]. Примем следующую упрощенную геометрическую модель: представим ударник и мишень в виде прямоугольных параллелепипедов с размерами:  $h_{IM} = 0,04$  мм,  $h_T = 2,85$  мм,  $w = 3,25$  мм (Рис. 3).

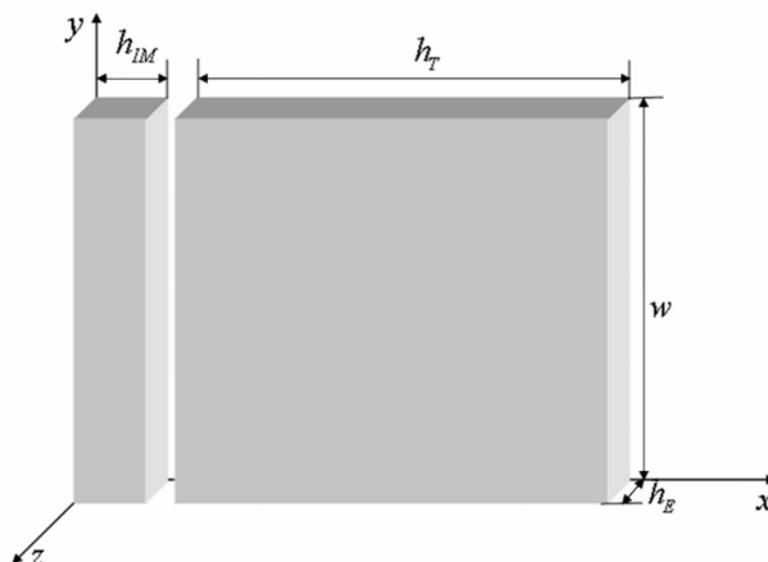


Рис. 3. Геометрическая модель

Значения параметров  $h_{IM}, h_T$  соответствуют данным работы [11]. Значение параметра  $w$  выберем произвольно, так как оно не играет роли при тех граничных условиях, которые используются в данной работе. Третий размер  $h_E$  приравняем размеру конечного элемента. Поставим следующие кинематические граничные условия:

$$\begin{cases} u_y = 0, & \text{при } y = 0, & 0 \leq x \leq h_{IM} + h_T, & 0 \leq z \leq h_E, \\ u_y = 0, & \text{при } y = w, & 0 \leq x \leq h_{IM} + h_T, & 0 \leq z \leq h_E, \\ u_z = 0, & \text{при } z = 0, & 0 \leq x \leq h_{IM} + h_T, & 0 \leq y \leq w, \\ u_z = 0, & \text{при } z = h_E, & 0 \leq x \leq h_{IM} + h_T, & 0 \leq y \leq w. \end{cases} \quad (1)$$

На остальных гранях положим равенство нулю вектора напряжений (выполняются естественные граничные условия).

Условия (1) приводят к тому, что фактически задача решается в плоской постановке, но с использованием трехмерных (3D) конечных элементов. При этом по толщине пластины (вдоль оси  $z$ ) модель содержит лишь один конечный элемент. С одной стороны, использование одного элемента по толщине позволяет значительно уменьшить число степеней свободы, с другой — использование 3D конечных элементов более предпочтительно по сравнению с использованием двухмерных (2D) конечных элементов, что объясняется особенностями пакета LS-DYNA. В частности, в трехмерной постановке предлагаются более гибкие контактные алгоритмы, позволяющие проводить более точную настройку модели. Кроме того, граничные условия (1) позволяют исключить влияние на результаты различных краевых эффектов, таких как, например, боковая разгрузка [12].

Для дискретизации области воспользуемся 8-узловыми конечными элементами с одной точкой интегрирования. С помощью данных элементов во всей области, включающей ударник и мишень, построим регулярную сетку. Размер конечного элемента выберем равным 1 мкм. При этом сетка содержит 637656 узлов и 526500 элементов.

В начальный момент времени сообщим всем узлам ударника скорости, имевшие место в эксперименте [11], — 660 м/с и направленные вдоль оси  $x$ .

### 3.2. Модель Джонсона–Кука

При моделировании соударения важную роль играет описание пластических эффектов в материале. Именно с пластическим деформированием обычно связывают образование в теле ударных волн [14]. Особенностью высокоскоростных динамических задач является то, что при их решении необходимо учитывать такие факторы, как скорость деформирования, температура и так далее. На практике для этого часто используется модель Джонсона–Кука [4], согласно которой предел текучести определяется формулой

$$\sigma_y = \left( A + B \varepsilon_p^n \right) \left( 1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_p$  — эффективная пластическая деформация,  $T_m$  — температура плавления,  $T_r$  — комнатная температура,  $A, B, c, n, m, \varepsilon_0$  — параметры модели. Точка обозначает

производную по времени. Формула (2), по сути, представляет собой кривую деформирования материала.

Для описания разрушения материала Джонсона–Кука в пакете LS-DYNA по умолчанию используется модель [10], согласно которой разрушение конечного элемента происходит, если параметр поврежденности  $D$  становится равным единице:

$$D = \frac{1}{\varepsilon_f} \sum_i \Delta \varepsilon_p^i,$$

где  $\Delta \varepsilon_p^i$  — приращение эффективной пластической деформации в конечном элементе на  $i$ -м шаге интегрирования по времени. Величина  $\varepsilon_f$  вычисляется по формуле

$$\varepsilon_f = \left( D_1 + D_2 \exp \left( D_3 \frac{p}{\sigma_{ef}} \right) \right) \left( 1 + D_4 \ln \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} \right) \left( 1 + D_5 \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right), \quad (3)$$

где  $D_1, \dots, D_5$  — параметры материала;  $\sigma_{ef}$  — эффективное напряжение;  $p$  — давление в рассматриваемом конечном элементе.

Значения параметров  $D_1, \dots, D_5$  для различных типов алюминия, взятые из работ [5–8], приведены в таблице 1. Из таблицы видно, что они отличаются очень значительно даже для одной и той же марки алюминия (см., например, данные для Al 6061-T6). По-видимому, это говорит о том, что данные параметры существенно зависят от условий конкретного эксперимента и не отражают свойств самого материала. Использование модели разрушения (3) привело бы к значительному разбросу в результатах и существенно усложнило задачу идентификации параметров. Поэтому в настоящей работе использовался критерий разрушения по максимальным напряжениям. Иными словами, считалось, что разрушение происходит при выполнении следующего неравенства:

$$\sigma_1 \geq \sigma_{\max}, \quad (4)$$

где  $\sigma_1$  — максимальное главное напряжение. Данный критерий, как отмечается в [2], широко применяется на практике при описании откольного разрушения. Далее будет показано, что, несмотря на чрезвычайную простоту критерия (4), его использование позволяет добиться хорошего количественного совпадения результатов расчета с экспериментальными данными.

Таблица 1. Параметры модели разрушения

Параметры материала	Марка материала				
	Al 6061-T6	Al 6061-T6	AA 5083-H116	Al 1183-H116	Al
$D_1$	-0,770	0,071	0,178	0,071	0,140
$D_2$	1,450	1,248	0,389	1,248	0,140
$D_3$	-0,470	-1,142	-2,246	-1,142	-1,500
$D_4$	0	0,147	0	0,147	-
$D_5$	1,600	0	0	0	-

Помимо модели пластичности при моделировании высокоскоростного взаимодействия твердых тел важную роль играет вид уравнения состояния для давления. В частности, уравнение состояния отвечает за скорость распространения ударной волны [1]. В LS-DYNA используется уравнение в форме Ми–Грюнайзена [10]:

$$p = \begin{cases} \frac{\rho_0 v_0^2 \vartheta \left( 1 + \left( 1 - \frac{\Gamma_0}{2} \right) \vartheta - \frac{\zeta}{2} \vartheta^2 \right)}{1 - (S_1 - 1) \vartheta - S_2 \frac{\vartheta^2}{\vartheta + 1} - S_3 \frac{\vartheta^3}{(\vartheta + 1)^2}} + (\Gamma_0 + \zeta \vartheta) U_T, & p > 0, \\ \rho_0 v_0^2 \vartheta + (\Gamma_0 + \zeta \vartheta) U_T, & p < 0, \end{cases}$$

где  $\vartheta = \frac{V_0}{V} - 1$ ;  $v_0$  — объемная скорость звука;  $\Gamma_0$  — коэффициент Грюнайзена;  $\zeta$  — коэффициент, характеризующий наклон графика зависимости коэффициента Грюнайзена от объема;  $U_T$  — удельная внутренняя энергия (отнесенная к начальному объему);  $S_i$  — коэффициенты наклона ударной адиабаты [10].

#### 4. Основные результаты

Для исследования влияния параметров принятой модели материала на скорость свободной поверхности мишени проведена серия расчетов с различными значениями параметров. Упругие модули материала выбирались исходя из значений продольной и объемной скоростей звука, приведенных в работе [11]:  $v_l = 6,4$  км/с,  $v_0 = 5,25$  км/с. В качестве первого приближения для модуля Юнга  $E$ , коэффициента Пуассона  $\mu$  и параметров модели  $B, c, m$  использовались значения (см. таблицу 2), взятые в работах [5–8].

Остальные величины во всех расчетах равнялись:  $\rho_0 = 2610$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_V = 910$  Дж/кг К,  $T_r = 293$  К,  $T_m = 893$  К,  $A = 0,123$  ГПа,  $\dot{\epsilon}_0 = 1,5 \cdot 10^{-4}$  сек<sup>-1</sup>,  $n = 1$ ,  $v_0 = 5250$  м/с,  $S_2 = S_3 = 0$ ,  $\sigma_{\max} = 2,5$  ГПа,  $\Gamma_0 = \zeta = 2$ . Значения параметров  $A$ ,  $\sigma_{\max}$  подбирались по величинам  $A_2, A_6$  (см. Рис. 2), известным из эксперимента [11].

Таблица 2. Значения параметров, используемые при моделировании

Характеристики материала и параметры модели	Номер расчета						
	МКЭ1	МКЭ2	МКЭ3	МКЭ4	МКЭ5	МКЭ6	МКЭ7
$E$ , ГПа	70,35	70,35	70,35	70,35	125,17	125,17	125,17
$\mu$	0,337	0,337	0,337	0,337	0,21	0,21	0,21
$B$ , ГПа	0	0	7,0	0	7,0	7,0	7,0
$c$	0	0	0	0,1	0	0	0,05
$m$	0	0	0	0	0	0	1,0
$S_1$	0	1,5	1,5	1,5	1,5	3,0	3,0

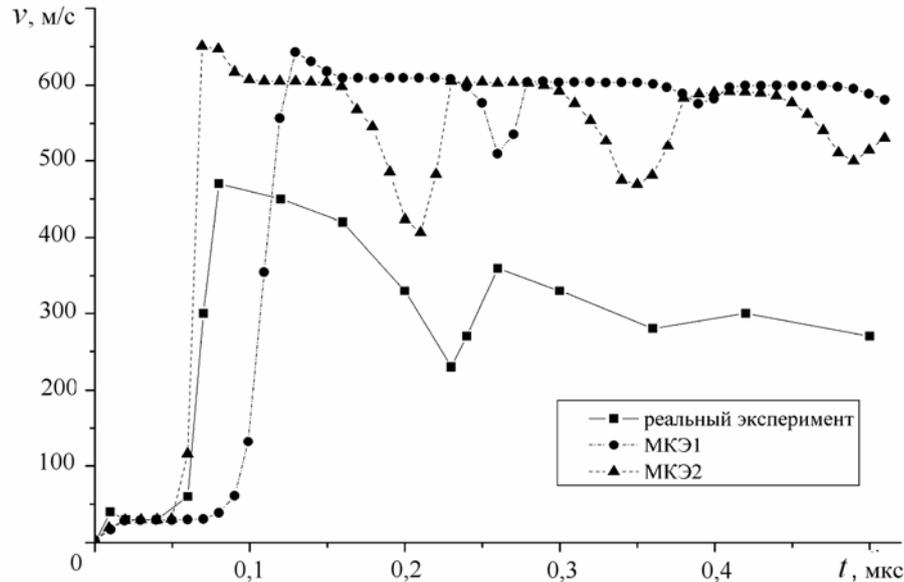


Рис. 4. Зависимость скорости свободной поверхности от времени в эксперименте и расчетах: без учета упрочнения и нелинейности  $p(\vartheta)$  (МКЭ1); без учета упрочнения и с учетом нелинейности (МКЭ2)

Обсудим результаты первых двух расчетов, обозначенные как МКЭ1 и МКЭ2. В первом расчете принята максимально простая модель, не учитывающая упрочнение материала ( $B=0$ ) и нелинейность зависимости  $p(\vartheta)$  ( $S_1=S_2=S_3=0$ ). Во втором — указанная нелинейность учтена ( $S_1=1,5$ ;  $S_2=S_3=0$ ). Зависимости скорости свободной поверхности от времени в натурном эксперименте и расчетах приведены на рисунке 4. Из графика видно, что в расчете МКЭ1 скорости упругого предвестника и ударного фронта не соответствуют экспериментальным данным. Расхождение объясняется следующим образом. При  $S_1=S_2=S_3=0$  скорость ударной волны не зависит от скорости ударника и равна  $v_0$ , что не соответствует действительности [1]. В расчете МКЭ2 удалось устранить расхождение путем подбора параметра  $S_1$ . Однако результаты расчета МКЭ2 далеки от экспериментальной кривой: расчетная амплитуда пластического фронта существенно превышает реальную. По-видимому, это связано с недостаточными потерями энергии в модели.

Одним из способов увеличения потерь на совершение пластической работы является учет упрочнения в модели. В расчете МКЭ3 в модель введен отвечающий за упрочнение параметр  $B$ . Результаты расчета приведены на рисунке 5. Видно, что упрочнение существенно меняет вид пластического фронта, однако добиться совпадения с экспериментом не удастся и здесь. Другим способом снижения амплитуды пластического фронта служит введение вязкости (параметр  $c$  в модели (2)). Из рисунка 5 (расчет МКЭ4) видно, что вязкость понижает пластический фронт и увеличивает амплитуду упругого предвестника.

Во всех численных экспериментах пластический фронт имеет резкий максимум. Для того чтобы понять причину его появления, построим зависимости массовых скоростей нескольких точек мишени от времени (Рис. 6). Данные точки взяты на оси  $x$  так, чтобы они делили мишень на приблизительно равные части (точное расположение точек не важно, так как они нужны только для качественного пояснения происходящих в мишени волновых процессов). Из рисунка видно, что максимум на пластическом фронте обусловлен взаимодействием ударной волны и упругой волны разгрузки, идущей от свободной поверхности ударника. Ясно, что если бы упругая волна имела более высокую скорость, то она могла бы полностью разгрузить пластический фронт. В натурном

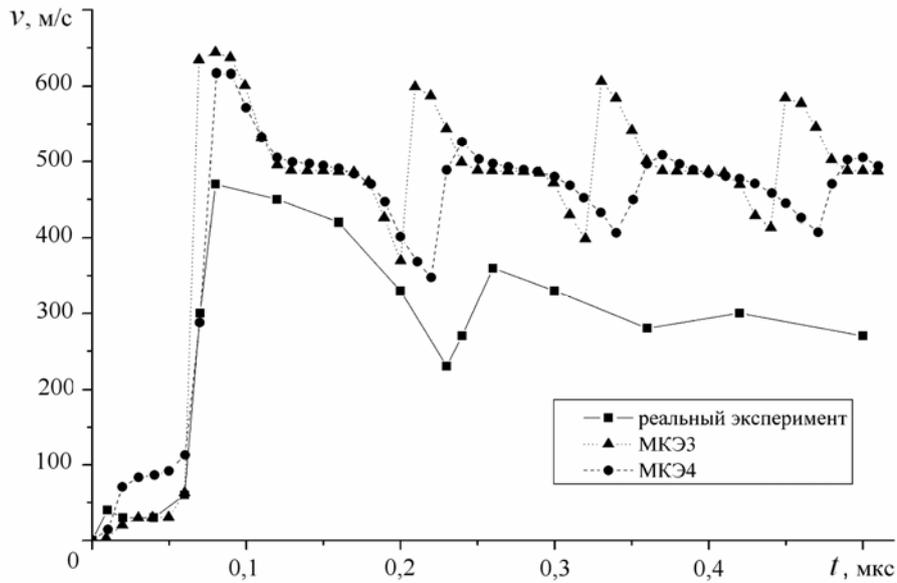


Рис. 5. Зависимость скорости свободной поверхности от времени в эксперименте и расчетах с учетом упрочнения (МКЭ3) и вязкости (МКЭ4)

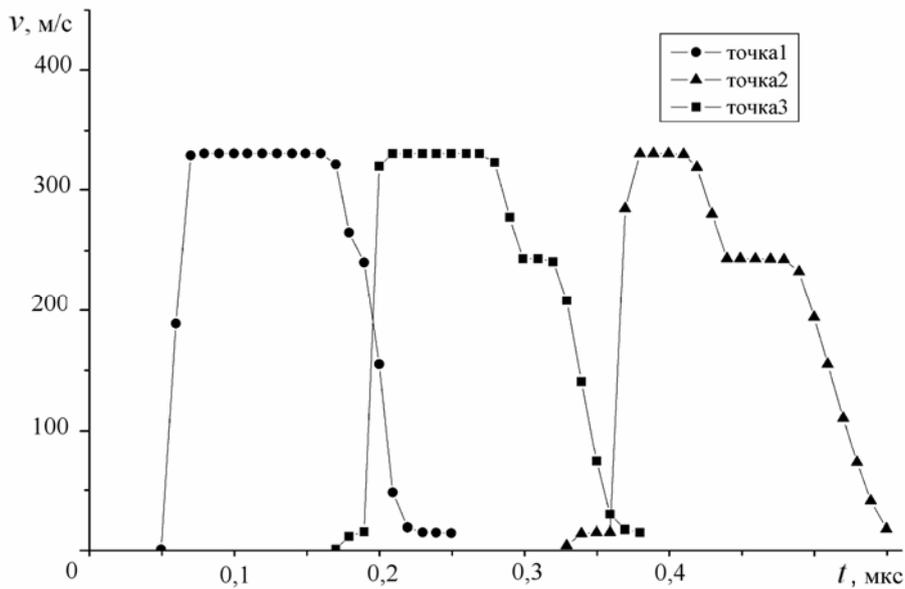


Рис. 6. Зависимость массовой скорости в трех точках мишени от времени

эксперименте ярко выраженного максимума на пластическом фронте не наблюдается. По-видимому, скорости звука, приведенные в работе [11] не соответствуют реальным скоростям в эксперименте. Сравним времена прихода упругой волны разгрузки и пластической волны на свободную поверхность. Для того чтобы упругая волна могла разгрузить пластическую волну, необходимо выполнение неравенства

$$\frac{2h_{IM} + h_T}{v_l} < \frac{h_T}{v_0} \Rightarrow \frac{v_0}{v_l} < \frac{h_T}{2h_{IM} + h_T}. \quad (5)$$

Нетрудно проверить, что параметры, приведенные в работе [11], не удовлетворяют неравенству (5). Покажем, что изменением отношения  $v_0/v_l$  можно существенно приблизить результаты расчета к результатам эксперимента. Подберем значения упругих модулей так, чтобы неравенство (5) выполнялось. В расчетах

МКЭ5–МКЭ7 (Рис. 7, 8) положим  $v_0/v_l \approx 0,71$  (при этом  $h_T/(2h_{IM} + h_T) \approx 0,78$ ). Соответствующие значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона возьмем из таблицы 2. В расчете МКЭ5 возьмем те же значения параметров, что и в расчете МКЭ3, кроме значений упругих модулей. Результаты расчетов МКЭ5, МКЭ6 приведены на рисунке 7. Видно, что, в отличие от расчетов МКЭ1–МКЭ4, пластический фронт не содержит ярко выраженного максимума. Однако при этом упругий предвестник сильно обгоняет фронт ударной волны. Для того чтобы повысить скорость ударной волны, увеличим значение параметра  $S_1$ . Получающаяся в результате зависимость скорости свободной поверхности от времени приведена на рисунке 7. Для лучшего совпадения с экспериментом введем также вязкость (параметр  $c$ ). Окончательная зависимость скорости свободной поверхности от времени, полученная в расчете МКЭ7, показана на рисунке 8.

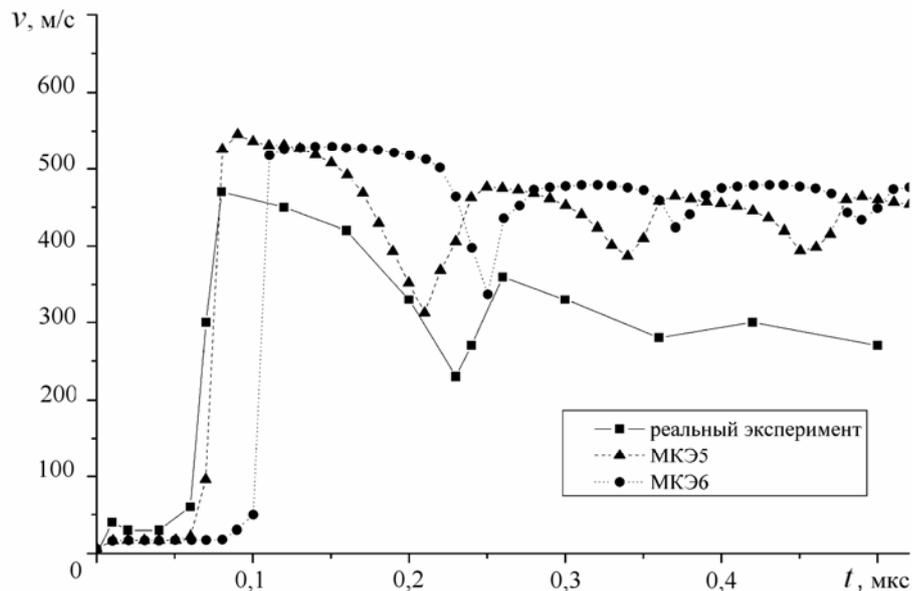


Рис. 7. Зависимость скорости свободной поверхности от времени в эксперименте и расчетах при условии выполнения неравенства (5) и различных значениях параметра  $S_1$  (МКЭ5 –  $S_1 = 1,5$ ; МКЭ6 –  $S_1 = 3$ )

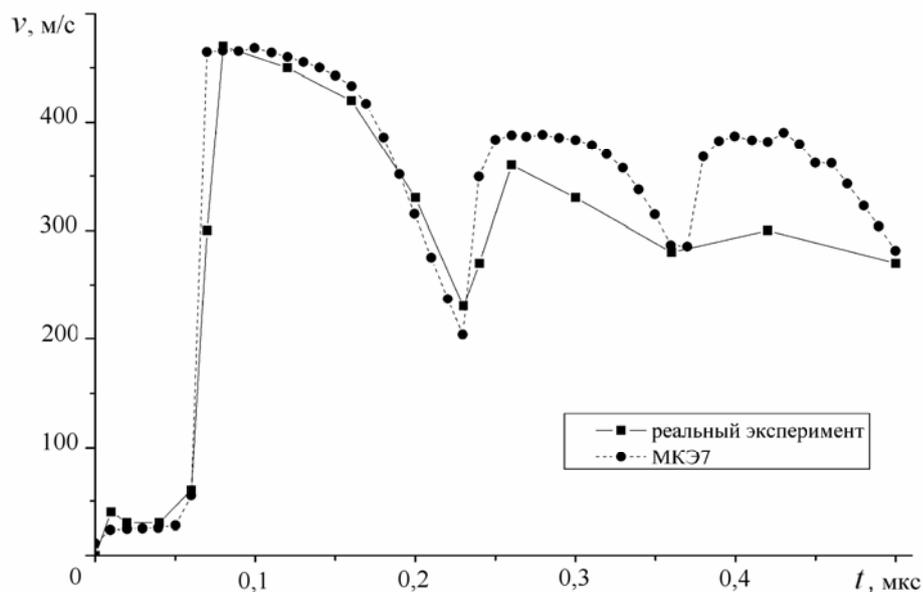


Рис. 8. Зависимость скорости свободной поверхности от времени в эксперименте и расчете (в МКЭ7, в отличие от расчета МКЭ6, учтена вязкость)

Таким образом, подбором параметров модели удается добиться практически полного соответствия упругого предвестника и пластического фронта, а также частоты колебаний откольной тарелки. Однако в эксперименте данные колебания затухают значительно быстрее, чем в расчете. Кроме того, скорость откольной тарелки в расчете выше, чем в эксперименте.

## 5. Заключение

В работе проведена идентификация параметров модели материала Джонсона–Кука по известной из эксперимента по соударению пластин зависимости скорости свободной поверхности от времени. Исследовано влияние параметров материала  $E$ ,  $\mu$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $c$ ,  $\sigma_{\max}$ ,  $S_1$  на данную зависимость. В результате численного моделирования показано, что при определенных соотношениях между скоростями  $v_0$  и  $v_l$  на фронте пластической волны появляется ярко выраженный максимум, отсутствующий на экспериментальной кривой. Появление максимума можно объяснить тем, что упругая волна разгрузки не успевает полностью разгрузить ударную волну в мишени. Изменение соотношения между  $v_0$  и  $v_l$  приводит к его исчезновению и, тем самым, позволяет приблизить результаты расчетов к экспериментальным данным.

Путем подбора характеристик материала удалось добиться практически полного совпадения результатов расчетов с экспериментальными данными. Исключение составляет описание движений откольной тарелки. В эксперименте затухание колебаний тарелки происходит значительно быстрее, чем в расчете. Средняя скорость откольной тарелки в расчете примерно на 10% выше, чем в эксперименте. В рамках модели, использованной в данной работе, основная часть энергии тратится на совершение пластической работы. Вероятнее всего, в эксперименте имеют место и другие механизмы диссипации. В частности, в расчетах не учитывается энергия образования свободной поверхности (откольной трещины). Учет данной энергии может существенно изменить скорость откольной тарелки. Кроме того, несоответствие результатов расчетов экспериментальным данным может быть обусловлено упрощением граничных условий, принятых в данной работе.

Авторы благодарны А.М. Кривцову за полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-01-00865\_a), фонда некоммерческих программ «Династия», а также гранта правительства Санкт-Петербурга.

## Литература

1. Ударные волны и экстремальные состояния вещества / Под ред. В.Е. Фортова, Л.В. Альтшулера, Р.Ф. Трунина, А.И. Фунтикова. – М.: Наука, 2000. – 425с.
2. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. – М.: Изд-во Янус-К, 1996. – 408с.
3. Глушак Б.Л., Куропатенко В.Ф., Новиков С.А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. – Новосибирск: Наука СО, 1992. – 295с.
4. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. of 7th Symposium on Ballistics, Hague, Netherlands, 1983. – P. 541-547.
5. Ozel T., Karpat Y. Identification of constitutive material model parameters for high-strain rate metal cutting conditions using evolutionary computational algorithms // Materials and Manufacturing Processes, 2007. – V. 22. – P. 659-667.

6. *Loikkanen M.J., Buyuk M., Kan C., Meng N.* A computational and experimental analysis of ballistic impact to sheet metal aircraft structures // Proc. of 5th European LS-DYNA Users Conference (Birmingham, UK, 2005). CD-ROM format. – Article 3c-79.
7. *Gryttena F., Børvik T., Hopperstada O.S., Langsetha M.* Quasi-static perforation of thin aluminum plates // Int. J. Imp. Eng. – 2009. – V. 36. – P. 486-497.
8. *Templeton D.W., Gorsich T.J., Holmquist T.J.* Computational study of a functionally graded ceramic-metallic armor // Proc. of 23rd International Symposium on Ballistics, 2007. – P. 1165-1163.
9. *Галлагер Р.* Метод конечных элементов. Основы. Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 428с.
10. *Hallquist J.O.* LS-DYNA: Theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, 1998. – 498p.
11. *Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е.* Экспериментальные профили ударных волн в конденсированных веществах. – М.: Физматлит, 2008. – 248с.
12. *Альтиуллер Л.В.* Применение ударных волн в физике высоких давлений // УФН. – 1965. – Т. 85, вып. 2. – С. 197-258.
13. *Sun J.S., Lee K.H., Lee H.P.* Comparison of implicit and explicit finite element methods for dynamic problems // Journal of Material Processing Technology. – 2000. V. 105. – P. 110-118.
14. *Holian B.L.* Atomic computer simulations of shock waves // Shock waves. – 1995. – V. 5. – P. 149-157.

*Поступила в редакцию 22.09.09.*

---

*Сведения об авторах*

*Кузькин Виталий Андреевич*, мнс, Институт проблем машиноведения РАН, 199178, С.-Петербург, Большой пр., д. 61; E-mail: kuzkinva@gmail.com

*Михалюк Дмитрий Сергеевич*, нач. отдела, С.-Петербургский государственный политехнический университет, НИИ материалов и технологий, 195220, С.-Петербург, Гражданский пр., д. 28а, НУК СПбГПУ; E-mail: mikhaluk@CompMechLab.com