

УДК 632.451.3+532.5

КАРТИНА РАЗРУШЕНИЯ ПЛАСТИНЫ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПРИ ВНЕДРЕНИИ СТРУИ ОТ ЛИНЕЙНОГО КУМУЛЯТИВНОГО ЗАРЯДА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ОТКОЛА

Д.-Чж. Люй, В.-Ж. Хун, М.-Ч. Юань, Х.-Цз. Сюань

Чжэцзянский университет, 310027 Ханчжоу, Китай, hongwr@zju.edu.cn

С использованием коммерческого кода LS-DYNA проведено моделирование внедрения струи от линейного кумулятивного заряда в пластину титанового сплава TC4 (Ti—6Al—4V) средней толщины. Полученные профили разрушения находятся в хорошем соответствии с экспериментальными наблюдениями, что подтверждает правильность кода и модели Джонсона — Кука, используемой для описания титановой пластины. На основе сравнения результатов моделирования и экспериментов построена картина разрушения пластины.

Ключевые слова: линейный кумулятивный заряд, внедрение, отражение волны напряжений, откол, картина разрушения.

DOI 10.15372/FGV20170316

ВВЕДЕНИЕ

Линейный кумулятивный заряд (ЛКЗ), часто используемый в военных и гражданских целях, может генерировать металлическую струю, которая способна глубоко проникать в мишень [1]. К настоящему времени выполнено большое количество исследований ЛКЗ, как теоретических и численных, так и лабораторных и полевых. Однако многие такие работы нашли применение в военной промышленности и в открытой печати не публиковались.

В связи с развитием вычислительной техники и численных методов экспериментальные исследования всё чаще комбинируют с компьютерным моделированием, что позволяет проводить более детальный анализ результатов. В экспериментах [2] исследовались влияние кумулятивного заряда на формирование струи и особенности ее внедрения в горную породу. В работе [3] проведено моделирование процессов формирования, фрагментации и внедрения кумулятивной струи в горную породу. В [4] предложена модификация теории Бирхгофа, позволяющая сформулировать стационарное аналитическое уравнение движения облицовки ЛКЗ, основанное на использовании уг-

ла раствора Тэйлора. Там же выполнены вычисления с целью установить динамику струи при детонации и картину движения перед ее соударением с мишенью [5]. В работе [6] изучались потенциально возможные механизмы разрушения струи. Проведенные исследования по эффективному внедрению струи показали, что здесь важны многие факторы, а именно: способ инициирования [7], асимметрия заряда [8, 9], параметры структуры [10], прочность мишени [11], длина зазора [12] и др. Не так давно стал расти интерес к внерешеточному моделированию методами частиц, которые, как ожидается, превзойдут традиционные решеточные методы для описания значительных деформаций, большой неоднородности и подвижных границ. К таковым относятся гидродинамический метод сглаженных частиц (SPH) [1, 13, 14] или многофазный SPH (MSPH) [15].

При пробивании пластин средней толщины кумулятивным зарядом необходимо учитывать распространение и отражение волн [16]. Ударная волна сжатия, возникающая после воздействия, отражается нижней свободной поверхностью и преобразуется в волну растягивающих напряжений сравнительно большой амплитуды. Сложение действий этой отраженной волны и падающей волны дает суммарное растягивающее напряжение, которое может вызвать отслоения (откол) [17]. В литературе недостаточно представлено изучение этого процесса.

© Lyu D.-Zh., Hong W.-R., Yuan M.-Ch., Xuan H.-J., 2017.

Institute of Process Equipment, College of Energy Engineering, Zhejiang University, 310027 Hangzhou, China.

В данной работе проведено моделирование процесса внедрения струи от ЛКЗ в пластину TC4 (Ti—6Al—4V) с использованием коммерческого кода LS-DYNA на основе метода конечных элементов для определения оптимального расстояния от заряда до мишени. Для описания поведения материала пластины TC4 применялась модель Джонсона — Кука, в которой учитываются деформационное упрочнение, упрочнение вследствие увеличения скорости деформации, размягчение и плавление при увеличении температуры, сжимаемость и вязкопластичность [18]. В процессе внедрения зарегистрировано откольное разрушение. На основе сравнения результатов моделирования с данными экспериментов исследован характер разрушения. Проведено исследование и сопоставление двух эффектов в модели Джонсона — Кука, связанных со скоростью деформации.

1. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

1.1. Модели материалов и параметры

В качестве взрывчатого вещества в ЛКЗ использовалось соединение В, облицовка была выполнена из свинца, мишень — пластина титанового сплава TC4. Все параметры материалов приведены в табл. 1–4 в формате

Таблица 1

Параметры взрывчатого вещества соединения В [7]

*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN							
ID	ρ	D	P_{C-J}				
1	1.717	0.798	0.295				
*EOS_JWL							
ID	A	B	R_1	R_2	ω	E_0	V_0
1	5.242	$7.678 \cdot 10^{-2}$	4.2	1.1	0.34	$8.5 \cdot 10^{-2}$	1

ключевых слов пакета LS-DYNA [19]. В модели Джонсона — Кука используется формулировка скорости вязкопластического напряжения $VP = 1$ [20]. Численная модель сформулирована в единицах см/г/мкс, поэтому единица давления равна 10^{11} Па и единица энергии равна 10^5 Дж.

1.2. Схема моделирования

На рис. 1,а показана конфигурация струи ЛКЗ, внедряющейся в пластину TC4. На верхней поверхности пластины выфрезерован паз глубиной 7 мм и шириной 15 мм, для того чтобы обеспечить оптимальное расстояние (7 мм),

Таблица 2

Параметры свинца [7]

*MAT_STEINBERG																	
ID	ρ	G_0	σ_0	β	n	γ_i	σ_m	b	b'	h	f	A	T_{m0}	γ_0	a	PC	$Spall$
2	11.34	0.086	$0.8 \cdot 10^{-4}$	110.00	0.52	0	0.001	11.63	11.63	0.00116	0.001	207.2	760	2.74	2.2	-9.00	3.00
*EOS_GRUNEISEN																	
ID	C	S_1	S_2	S_3	γ	α	E_0	V_0									
2	0.2006	1.429	0.8506	-1.64	2.77	0.54	0	1									

Таблица 3

Параметры воздуха [21]

*MAT_NULL									
ID	ρ								
3	$0.129 \cdot 10^{-2}$								
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL									
ID	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0	V_0
3	$-1.0 \cdot 10^{-6}$	0	0	0	0.4	0.4	0	$2.5 \cdot 10^{-6}$	1

Таблица 4

Параметры титанового сплава TC4 [22]

*MAT_JOHNSON_COOK											
ID	ρ	G	E	PR	DTF	VP	A	B	N	C	M
4	4.44	0.410	1.13	0.33	0	1(0)	0.01098	0.01092	0.93	0.014	1.1
T_m	T_r	$EPSO$	CP	PC	$Spall$	IT	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
1878.0	293.0	$1.0 \cdot 10^{-6}$	$5.8 \cdot 10^{-6}$	-9.0	2.0	0	-0.09	0.27	0.48	0.014	3.87

*EOS_GRUNEISEN									
ID	C	S_1	S_3	S_3	γ	α	E_0	V_0	
4	0.513	1.03	0	0	1.23	0	0	1	

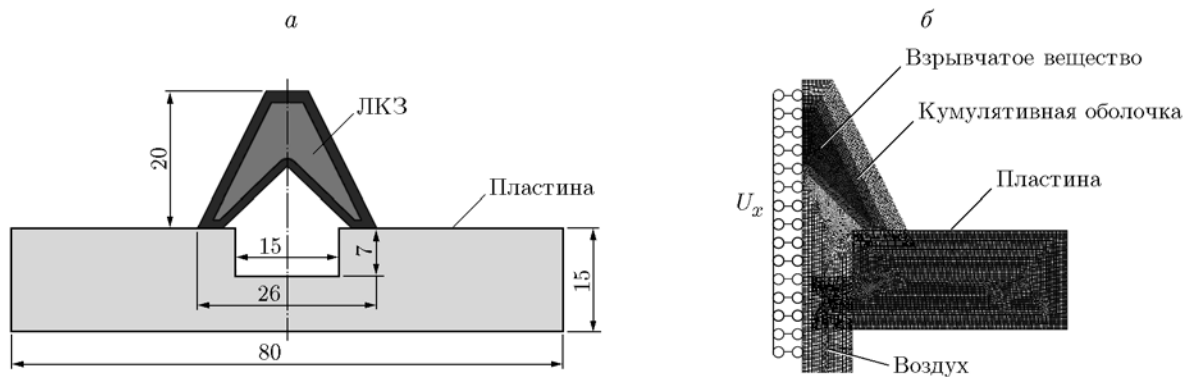


Рис. 1. Конфигурация струи линейного кумулятивного заряда, внедряющейся в пластину TC4 (а), моделирование методом конечных элементов (б):

размеры модели указаны в миллиметрах

указанное производителем. При высоте зазора 7 мм реальная толщина проникания равна 8 мм. Все поверхности пластины TC4 свободные.

Вследствие плоской симметрии моделировалась только половина сборки. Перемещение узлов по поверхности симметрии в направлении оси X ограничено ($U_x = 0$), как показано на рис. 1,б. Более того, если пренебречь тем, что размер заряда вдоль оси симметрии конечен и считать его бесконечным для большего заряда, можно сконструировать модель на однослойной сетке в направлении оси Z (0.02 мм), ограничивая в этом направлении движение всех узлов ($U_z = 0$). Данное упрощение позволяет использовать все преимущества произвольной лагранжево-эйлеровой формулировки для элемента мультиматериала, с помощью которой можно существенно уменьшить вычислительные затраты и время.

Использован тип элемента SOLID 164 и

пространственное разрешение 0.2 мм. Аппроксимация конечными элементами описывает четыре части схемы: взрывчатое вещество, металлическая облицовка, воздух и пластина TC4. Первые три части моделируются в одной группе мультиматериала и связаны с пластиной TC4, которая покрыта лагранжевой сеткой. Взрывчатка инициируется, как обычно, в одной точке на краю сборки, на вертикальной оси симметрии.

1.3. Анализ процесса внедрения

Согласно общепринятой теории внедрения непрерывной металлической струи от ЛКЗ, процесс внедрения в мишень можно разделить на три стадии: формирование кратера, квазистационарное внедрение и завершение [23].

После инициирования ЛКЗ в начальный момент времени ($t = 0$) облицовка сжимается и генерируется сфокусированная струя. Осколки



Рис. 2. Первичная ударная волна сжатия, вызванная осколками облицовки ($t = 3.8463$ мкс)



Рис. 3. Стадия формирования кратера: вершина струи ударяет в дно выемки ($t = 9.9991$ мкс)

облицовки начинают контактировать с верхней частью пластины до того, как вершина струи ударяет в дно канавки, и первичная ударная волна сжатия внедряется в пластину, как представлено на рис. 2. Поскольку амплитуда начальной волны сжатия относительно невелика, она уходит из зоны внедрения и потому слабо влияет на внедрение и разрушение. Все последующие рисунки показывают контур пластины и распределение давления, а взрывчатое вещество, облицовка и воздух не показаны.

При $t = 9.9991$ мкс вершина струи ударяет в дно выемки, вмятина указывает на начало формирования кратера. Давление, создаваемое вершиной струи, не является наибольшим в процессе внедрения. Оно равно только 3.45 ГПа, как показано на рис. 3, хотя скорость вершины струи наибольшая благодаря ее градиенту. Считая струю неоднородной по ширине, можно заключить, что давление при ударе зависит как от скорости, так и от массы химического элемента вещества струи. Глубина внедрения струи на этапе формирования кратера примерно 1 мм.

Далее внедрение продолжается в квазистационарном режиме. При $t = 10.246$ мкс вследствие удара формируется сильная ударная волна сжатия (рис. 4, *a*), интенсивность которой равна 18.6 ГПа, что значительно превышает прочность материала. Материал переходит в состояние с высокими температурой, давлением и скоростью деформации после прохождения волны, и давление на границе вершины струи и пластины быстро уменьшается до

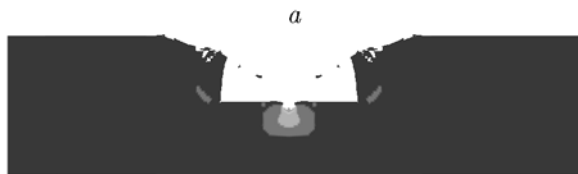


Рис. 4. Квазистационарное внедрение:

a — генерирование первой ударной волны сжатия, $t = 10.246$ мкс, *б* — фронт волны, $t = 10.499$ мкс



Рис. 5. Положение первой ударной волны сжатия вблизи нижней стороны пластины ($t = 11.5$ мкс)

3 ГПа или даже ниже, за счет пластического течения (рис. 4, *б*). Тем не менее скорость внедрения остается высокой и примерно постоянной. Действительно, если учитывать градиент скорости вдоль струи, неоднородность ширины струи и сжимаемость материала, то параметры внедрения будут отличаться от параметров, соответствующих стационарному состоянию струи. Однако эти изменения умеренные и непродолжительные в зоне пластического течения, так что внедрение на этом этапе можно считать квазистационарным [24].

Амплитуда ударной волны от первого удара уменьшается примерно до 0.6 ГПа, когда волна доходит до задней стороны пластины, и суммарное растягивающее напряжение нарастает благодаря отражению. Но оно недостаточно сильное для того, чтобы вызвать отколы (рис. 5).

При $t = 11.896$ мкс в струе образуются перетяжки и она распадается на два участка. Первый из них теряет всю свою энергию и прилипает к пластине, что приводит к большой потере в скорости внедрения. Первое квазистационарное внедрение заканчивается на глубине 3 мм. Следующая часть струи продолжает дви-



Рис. 6. Начальная стадия второго квазистационарного внедрения, образование новой ударной волны ($t = 11.896$ мкс)



Рис. 8. Профиль разрушений, полученный моделированием ($t = 15.996$ мкс)

гаться вниз и ударяет пластину, в результате чего образуется новая ударная волна, в которой пиковое давление достигает 25 ГПа (рис. 6). Внедрение снова ускоряется, давление на границу раздела уменьшается при переходе материала в состояние пластического течения по мере того, как фронт волны охватывает эти области. Внедрение становится квазистационарным во второй раз.

Когда эта ударная волна сжатия достигает нижней стороны пластины, амплитуда волны уменьшается до 6.21 ГПа (рис. 7,а). Отрицательное давление величиной до 3.13 ГПа возникает в результате отражения, аналогично тому, как описано выше. Это достаточно высокое давление, чтобы началось динамическое отслоение. На рис. 7,б показаны откольная трещина и новая свободная поверхность. Толщина этого первого отколовшегося слоя примерно 1 мм. Слой продолжает двигаться вниз с приобретенным импульсом, в результате чего на нижней стороне пластины образуется заметная выпуклость. После первого значительного откола последующие волны сжатия продолжатся

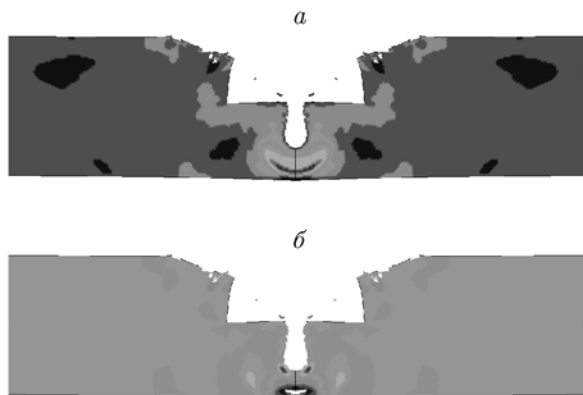


Рис. 7. Откольная трещина и новая свободная поверхность внутри пластины:

а — положение второй ударной волны сжатия около нижней стороны пластины, $t = 12.495$ мкс, б — откольная трещина, $t = 12.849$ мкс

ют отражаться от новой свободной поверхности. На это указывает тот факт, что на область между вершиной струи и откольной трещиной одновременно влияют как внедрение струи, так и напряжение растяжения, вызванное отражением. И накопление разрушения, и релаксация напряжения заметно ослабляют сопротивление этой области разрушению.

После разрушения пластины взаимодействие между струей и пластиной заканчивается, в то время как волна напряжений продолжает распространяться, отражается и затухает в пластине. Профиль разрыва, полученный при моделировании, показан на рис. 8 и подробно обсуждается в § 2.1.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Анализ профиля и характера разрушений

Рис. 9 иллюстрирует весь процесс внедрения струи от ЛКЗ в пластину ТС4. Разрушение пластины проходит четыре стадии: формирование кратера, первое и второе квазистационарное внедрение, откол. Стоит отметить, что трещина образуется перед тем, как наступила финальная стадия.

Профиль разрушения может быть разделен на два участка. Верхний участок толщиной 4 мм, в наибольшей степени подвергавшийся удару и внедрению, включает в себя кратер (1 мм) и область первого квазистационарного внедрения (3 мм). На вид он оказывался гладким и имеющим металлический блеск благода-



Рис. 9. Картина разрушения пластины ТС4

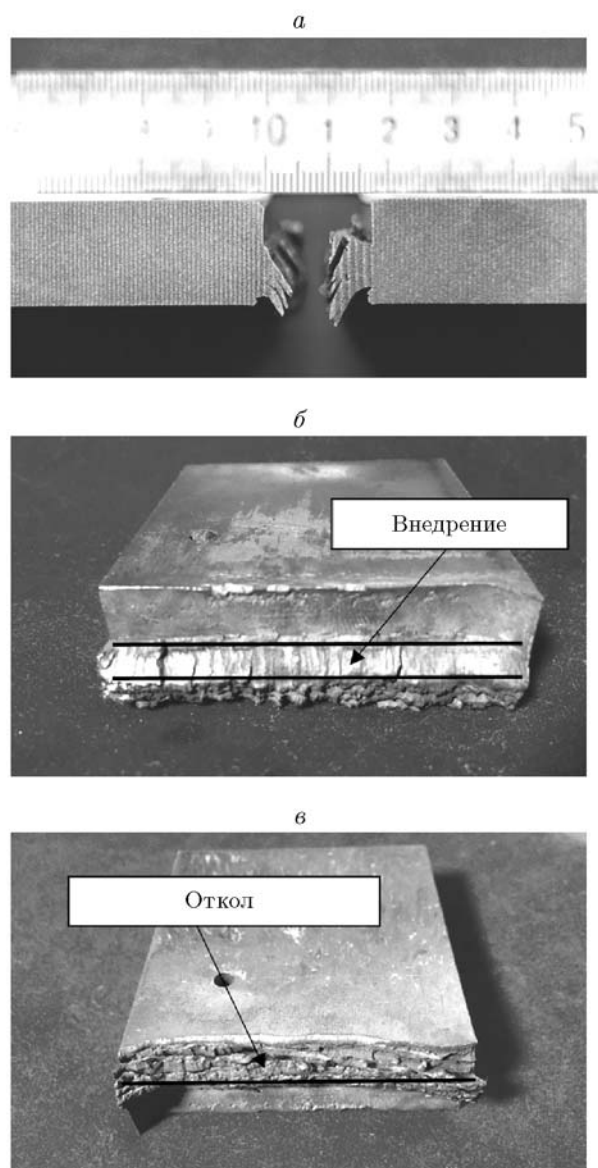


Рис. 10. Профиль разрушения в экспериментах (а) и его вид сверху (б) и снизу (в)

ря прилипанию струи. Нижний участок также толщиной 4 мм, включающий в себя область второго квазистационарного внедрения и область влияния откола, которые воздействовали одновременно, подобен рыбьей чешуе. Результаты моделирования и экспериментальные наблюдения находятся в хорошем соответствии (см. рис. 8 и 10). Область квазистационарного внедрения полностью попадает в зону влияния откола, так что довольно сложно установить характерную глубину внедрения. На поздних этапах внедрения отслоение, происходящее вследствие распространения волны напря-

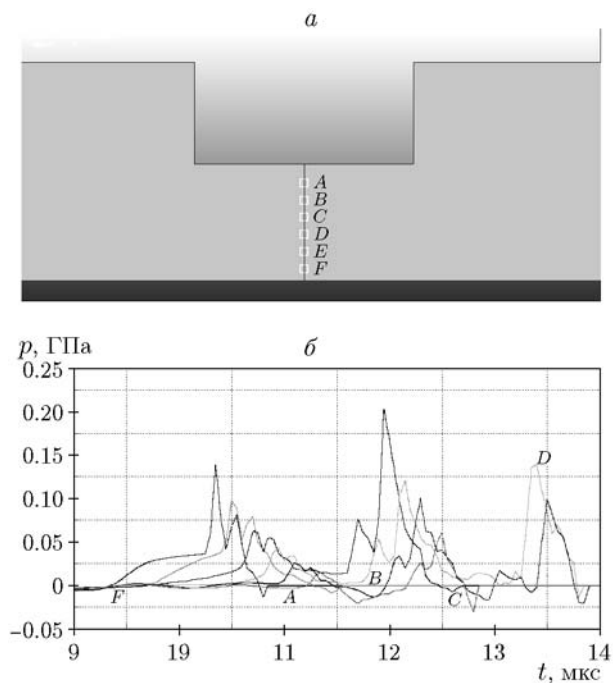


Рис. 11. Положение точек измерения давления (а) и профили давления в этих точках (б)

жений и ее отражения, играет доминирующую роль в окончательном разрушении пластины.

Мы выбрали шесть элементов А–F на оси симметрии пластины в модели конечных элементов. На рис. 11,а показано их положение, на рис. 11,б — зависимости давления в этих точках от времени. Видны три заметных пика давления, что указывает на три удара струи по пластине в процессе внедрения. Второй пик давления самый высокий (>20 ГПа), отражение этой волны приводит к отколу. Два последних удара происходят в области, находящейся под влиянием откола. Третий удар наблюдается уже после завершения откола. Каждый раз, когда происходит удар, материал перед вершиной струи переходит в состояние пластического течения, давление на границе раздела падает и внедрение можно считать квазистационарным.

Точка F находится ближе всего к нижней части пластины. При $t = 11.68$ мкс в этой точке возникает напряжение, создаваемое отраженной первой раз ударной волной сжатия, но откола не происходит до момента $t = 12.849$ мкс, когда в точке F во второй раз нарастает напряжение. Эта точка исчезает после образования откольной трещины, и давление в ней становится нулевым.

2.2. Формулировка в терминах скоростей деформации в модели Джонсона — Кука

Подвергаясь удару и внедрению, материал мишени деформируется и частично разрушается, если скорость деформации достаточно большая. Для ТС4 напряжение пластического течения резко возрастает с увеличением скорости деформации вследствие изменения механизма деформации, что известно как эффект упрочнения вследствие увеличения скорости деформации [22].

Возможны два способа учета влияния скорости деформации в модели Джонсона — Кука, которые выбираются с помощью переключения флага VP во входных параметрах [25]. Значение флага VP соответствует выбору той части тензора скоростей деформаций, которая используется при вычислении напряжений [26]. В стандартной формулировке ($VP = 0$) эффективная скорость деформации рассчитывается на основе компонент текущего тензора скоростей. А при вязкопластической деформации ($VP = 1$) эффективная скорость вычисляется на основе пластической части тензора скоростей деформаций. В этой последней формулировке эффективная скорость пластической деформации находится итерациями по неявной схеме интегрирования Эйлера на шаге корректора, которая обычно используется при описании металлов [27].

В общем случае при высокой скорости деформации значение $VP = 1$ обеспечивает хорошее согласие с экспериментом, тогда как $VP = 0$ приводит к завышенным значениям напряжения [28]. Кроме того, при $VP = 0$ часто возникают паразитные значения скорости деформации. Обычно выбор $VP = 1$ связан дополнительными издержками, ими можно пренебречь, если номер элемента в модели конечных элементов небольшой.

В нашем случае при моделировании использовалась формулировка в терминах вязкопластических скоростей деформации с ключом $VP = 1$. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными наблюдениями. Чтобы дополнительно подтвердить применимость этой формулировки, было выполнено моделирование при $VP = 0$ в модели конечных элементов, при этом другие параметры имели те же самые значения. На рис. 12 показаны контуры пластины и распределение давления в критические моменты времени. Эти картины

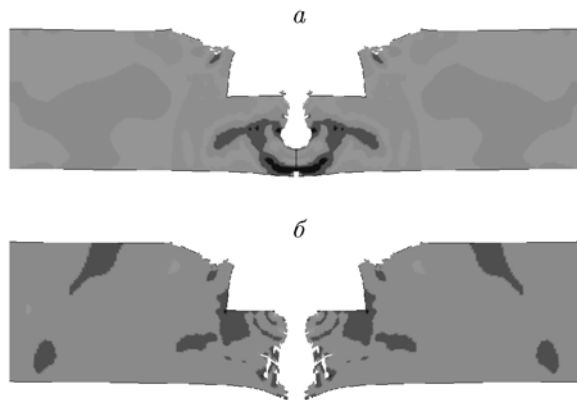


Рис. 12. Моделирование при $VP = 0$:

a — точки на свободной поверхности теряются в первую очередь, $t = 13.199$ мкс, b — вертикальная трещина, $t = 15.899$ мкс

сильно отличаются от приведенных на рис. 7, б и 8.

На рис. 12, a точки на свободной поверхности теряются первыми вследствие отражения волны напряжений, что нетипично для откола и не согласуется с экспериментальными наблюдениями. На рис. 12, b после разрушения пластины, кроме откольных трещин, видны вертикальные трещины, что также не согласуется с экспериментами.

Исследуя задачу о распространении и отражении волны, особенно с учетом интерференции отраженной и падающей волн, и считая, что различные области пластины деформируются при разных скоростях деформации, важно вычислять распределение напряжений максимально точно, чтобы получить точное значение суммарной амплитуды напряжений и конкретное расположение откольной трещины или новой свободной поверхности. В этом заключается причина того, что откол при внедрении воспроизводится при $VP = 1$ и не воспроизводится при $VP = 0$.

Таким образом, в случае, когда модель геометрически несложная и количество элементов в задаче не очень большое, применение формулировки в терминах скоростей вязкопластической деформации, путем выбора $VP = 1$, существенно для получения более адекватных и согласованных с экспериментами результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В тех случаях, когда ЛКЗ и пластина установлены так, чтобы выдерживалось опти-

мальное расстояние между ними, струя «разваливается» в процессе внедрения. Вследствие распада струи она несколько раз соударяется с пластиной, материал в области удара переходит в состояние пластического течения и внедрение можно рассматривать как квазистационарное.

2. Процесс разрушения материала проходит четыре стадии: формирование кратера, первое и второе квазистационарное внедрение, откол. На поздней стадии ударная волна сжатия отражается от нижней стороны пластины и превращается в волну разгрузки. Напряжение разгрузки вызывает откол, что играет ключевую роль в окончательном разрушении пластины.

В картине разрушения можно выделить два участка. Верхняя часть, которая подвергалась воздействию удара и в которой происходило внедрение струи, включает в себя кратер и область первого квазистационарного разрушения. Эта область гладкая и имеет металлический блеск вследствие прилипания материала струи. Нижняя часть, которая испытывала одновременное влияние внедрения и откола, включает в себя вторую область квазистационарного внедрения и область влияния отколов. Эта область выглядит как рыба чешуя. Результаты моделирования и экспериментов очень хорошо согласуются между собой.

3. Модель Джонсона — Кука в LS-DYNA позволяет выявить основные особенности поведения пластины TC4 при внедрении в нее кумулятивной струи и отколах, вызванных распространением и отражением волны. В этой модели существенным является использование формулировки в терминах скорости вязкопластических напряжений ($VP = 1$).

4. Моделирование методом конечных элементов в данной работе проводится на однослойной сетке. Если говорить о длине ЛКЗ, то аппроксимация конечными элементами может быть гораздо сложнее, что превращает моделирование в труднопреодолимую задачу. Здесь еще остается большое поле для исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Feng D. L., Liu M. B., Li H. Q., Liu G. R.** Smoothed particle hydrodynamics modeling of linear shaped charge with jet formation and penetration effects // *Computers & Fluids*. — 2013. — V. 86. — P. 77–85.
2. **Yu C., Tong Y., Yan C., Li F., Gui Y., Zhang M., Wang B., Xie P., Li L.** Applied research of shaped charge technology // *Intern. J. Impact Eng.* — 1999. — V. 23, N 1. — P. 981–988.
3. **Molinari J. F.** Finite element simulation of shaped charges // *Finite Elements in Analysis and Design*. — 2002. — V. 38, N 10. — P. 921–936.
4. **Lim S.** Steady state equation of motion of a linear shaped charges liner // *Intern. J. Impact Eng.* — 2012. — V. 44. — P. 10–16.
5. **Johnston M., Lim S.** Numerical observation of the jet flight patterns of linear shaped charges // *Appl. Sci.* — 2012. — V. 2, N 3. — P. 629.
6. **Cornish R., Mills J. T., Curtis J. P., Finch D.** Degradation mechanisms in shaped charge jet penetration // *Intern. J. Impact Eng.* — 2001. — V. 26. — P. 105–114.
7. **Yi J. K., Jiang X. Q., Peng H.** Effect of initiation ways on jet formation of linear shaped charge // *Chin. J. Explos. Propel.* — 2006. — V. 29, N 3. — P. 57–61.
8. **Ayisit O.** The influence of asymmetries in shaped charge performance // *Intern. J. Impact Eng.* — 2008. — V. 35, N 12. — P. 1399–1404.
9. **Ning Q., Fang X., Wang M. X.** Effect of asymmetry on linear shaped charge (in Chinese) // *J. Ballistics*. — 2011. — V. 23, N 2. — P. 96–100.
10. **Cui Y. H., Wan W. Q., Tian Q., Tang X. S., Deng Z. W.** Optimization design of linear shaped charge // *Initiators & Pyrotech.* — 2006. — V. 15, N 4. — P. 42–46.
11. **Gooch W. A., Burkins M. S., Walters W. P., Kozhushko A. A., Sinani A. B.** Target strength effect on penetration by shaped charge jets // *Intern. J. Impact Eng.* — 2001. — V. 26. — P. 243–248.
12. **Ma H. Y., Long Y., He Y. Y.** Numerical analysis on effects of burst height on penetration depth of LSCC // *Initiators & Pyrotech.* — 2008. — V. 17, N 4. — P. 28–32.
13. **Yang G., Han X., Hu D.** Computer simulation of two linear charge jet using smoothed particle hydrodynamics // *Eng. Comput.* — 2011. — V. 28, N 1. — P. 58–75.
14. **Liu M. B., Liu G. R., Lam K. Y., Zong Z.** Meshfree particle simulation of the detonation process for high explosives in shaped charge unlined cavity configurations // *Shock Waves*. — 2003. — V. 12, N 6. — P. 509–520.
15. **Qiang H. F., Wang K. P., Gao W. R.** Numerical simulation of shaped charge jet using multiphase SPH method // *J. Tianjin Univ.* — 2008. — V. 14, N 1. — P. 495–499.
16. **Zhang S. Z.** *Explosion and Impact Dynamics*. — Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1993. — (In Chinese).
17. **Wang L. L.** *Foundations of Stress Waves*. — Oxford: Elsevier, 2007.
18. **Kay G.** Failure Modeling of Titanium-61-4V and 2024-T3 Aluminum with the Johnson — Cook Material Model // *Tech. Rep., Lawrence Livermore National Laboratory*. — Livermore, CA, 2002.

19. **Hallquist J. O.** LS-DYNA Keyword User's Manual (Version 970). — Livermore Software Technology Corporation, California, 2003.
20. **Hallquist J. O.** LS-DYNA Theoretical Manual. — Livermore Software Technology Corporation, California, 1998.
21. **Mullin M. J., O'Toole B. J.** Simulation of energy absorbing materials in blast loaded structures // 8th Intern. LS-DYNA Users Conf., Michigan, USA, 2004.
22. **Lesuer D. R.** Experimental investigations of material models for Ti—6Al—4V titanium and 2024-T3 aluminum // Tech. Rep., Lawrence Livermore National Laboratory. — Livermore, CA, 1999.
23. **Yun S. R.** Explosion Mechanics. — Beijing: National Defend Industry Press, 2005. — (In Chinese).
24. **Huang Z. X.** Theory and Practice of Shaped Charge. — Beijing: Beijing Inst. Technol. Press, 2014. — (In Chinese).
25. **Du Bois P. A., Kolling S., Feucht M., Haufe A., DaimlerChrysler A. G.** A comparative review of damage and failure models and a tabulated generalization // 6th European LS-DYNA User's Conf., Gothenburg, Sweden, 2007.
26. **Lobdell M., Croop B., Lobo H.** Comparison of crash models for ductile plastics // 10th European LS-DYNA User's Conf., Würzburg, Germany, 2015.
27. **LS-DYNA Support.** — <http://www.dynasupport.com/howtos/material/viscoplastic-strain-rate-formulation-vp>. Viscoplastic strain rate formulation (VP). LSTC Inc.
28. **Storheim M., Amdahl J.** On the sensitivity to work hardening and strain-rate effects in nonlinear FEM analysis of ship collisions // Ships and Offshore Structures. — 2015. — DOI: 10.1080/17445302.2015.1115181.

*Поступила в редакцию 1/IV 2016 г.,
в окончательном варианте — 26/VII 2016 г.*
