

УДК 539.422.23

ЗАРОЖДЕНИЕ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ В КЛИНОВИДНОМ АЛЮМИНИЕВОМ ОБРАЗЦЕ ПРИ НАГРУЖЕНИИ СКОЛЬЗЯЩЕЙ ДЕТОНАЦИЕЙ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

О. Б. Дреннов, А. Г. Иоилев, С. С. Соколов, В. Н. Софронов,
А. Л. Стадник, Т. И. Чайка, Ю. В. Янилкин
(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской области)

Проведены эксперименты по нагружению клиновидных алюминиевых образцов скользящей детонацией тонкого слоя взрывчатого вещества. В каждом таком эксперименте реализуются условия зарождения и развития откольного разрушения, которое происходит в двумерном напряженно-деформированном состоянии материала. Полученные экспериментальные данные были использованы для валидации моделей кинетики зарождения и развития поврежденности материалов и поведения поврежденного материала, реализованных в расчетных методиках ТИМ и ЭГАК. Результаты валидационных расчетов находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными по длине откольной трещины и толщине откольного слоя.

Ключевые слова: детонация, ударная волна, откол, трещина, напряжение, деформация, пластичность, упрочнение, разупрочнение, вязкость, поврежденность, разрушение, валидация, расчетная методика ТИМ, расчетная методика ЭГАК.

Введение

При разработке конструкций, подвергающихся в процессе работы воздействию интенсивных импульсных нагрузок, критическим является вопрос разрушения. С точки зрения подробности описания динамического процесса кинетические модели разрушения предпочтительнее традиционно применяемых в численных методиках локальных критериев разрушения. Тем не менее в ряде случаев на практике технические модели оказываются удобнее в использовании с точки зрения как подбора параметров (учитывая накопленный за десятилетия исследований банк данных), так и экономии машинного времени. Однако в специфических задачах о поведении сложных систем при кратковременных воздействиях, когда время работы сравнимо со временем развития разрушения в материалах, например для процессов высокоскоростного разгона и пробивания, применение кинетического описания разрушения необходимо по существу [1].

Подходы кинетической теории пластического (вязкого) и хрупкого разрушения [1–3] были развиты на основе известной модели NAG (Nucleation and Growth) [4, 5]. Применение кинетической модели пластического (вязкого) разрушения типа NAG в *одномерных* расчетах плоского откола в металлах [2, 3, 6, 7] позволило получить хорошее согласие с известными экспериментальными данными. Вариант этой модели был внедрен в методики расчета двумерных упругопластических задач ДМК [8, 9] (лагранжева методика на неструктурированных многоугольных сетках) и МИМОЗА [10, 11] (лагранжево-эйлерова методика на структурированных четырехугольных сетках) в рамках подхода расщепления по физическим процессам.

Для валидации модели разрушения [12] был проведен простой по постановке специальный эксперимент. Цилиндр из стали 3 нагружался скользящей детонацией слоя взрывчатого вещества (ВВ) увеличивающейся толщины. В результате в цилиндре образовывалась осевая полость

конической формы, размеры которой были воспроизведены в валидационных расчетах.

В настоящей статье для валидации кинетических моделей вязкопластического разрушения используются результаты эксперимента другого типа — с нагружением клиновидных образцов скользящей детонацией тонкого слоя ВВ.

Экспериментальное исследование

Условия как зарождения, так и развития откольного разрушения можно определить в одном эксперименте [13], если образец в форме клина нагружать скользящей детонацией тонкого слоя ВВ (рис. 1, *а*). В результате отражения ударной волны (УВ) от свободной поверхности (в виде волны разрежения) в объеме образца реализуются условия растяжения, которые приводят к образованию откольной трещины; длительность импульса нагружения зависит от толщины слоя ВВ. В таких экспериментах можно также исследовать зависимость откола от профиля УВ и угла α выхода УВ на свободную поверхность образцов [14, 15]. Большое количество экспериментов такого рода проведено в РФЯЦ-ВНИИТФ (см., например, [16]). Поскольку в подобных экспериментах разрушение происходит в двумерном напряженно-деформированном состоянии материала, то их можно считать валидационными для моделей разрушения, используемых в *двумерных* и *трехмерных* расчетных методиках. Ниже излагаются результаты экспериментов по нагружению скользящей детонацией тонкого слоя ВВ клиновидных образцов из сплава АМг-6 в состоянии поставки, которые далее

использованы для валидации кинетических моделей вязкопластического разрушения.

Схема постановки экспериментов, а также геометрия и размеры образцов приведены на рис. 1. Слой ВВ (начальная плотность $\rho_0 = 1,52 \text{ г/см}^3$, скорость нормальной детонационной волны $D = 7,86 \text{ км/с}$) размещался на наклонной плоскости клина, толщина ВВ в опытах составляла 0,5, 1,0 и 1,5 мм. Детонация инициировалась у верхнего (см. рис. 1, *а*) края клина. Для того чтобы образующийся под действием давления продуктов взрыва (ПВ) изгиб тонкого края клиновидного образца, еще и ослабленного откольной трещиной, не искажал определяемую после опыта картину разрушения [14, 15], вершина (нижний край) клина была спилена, так что минимальная толщина образца составляла 2 мм. Спил на процесс развития откола не влияет, поскольку толщина откольного слоя составляет $\sim 1 \text{ мм}$ (см. ниже).

Результаты экспериментов с толщиной ВВ $h = 0,5 \text{ мм}$ приведены на рис. 2, *а, б* (фотографии *в профиль* образцов из алюминиевого сплава АМг-6 после опытов). При большей толщине ВВ откольный слой приобретает большую скорость и, отгибаясь, отрывается от остального образца (рис. 2, *в*). В результате состояние образцов после опыта не позволяет судить о том, на каком расстоянии от вершины клина начинается зарождение откола.

Численное моделирование

Численное моделирование экспериментов проведено с помощью методик ЭГАК [17] и ТИМ [18] в двумерной плоской постановке. Расчеты ЭГАК велись на неподвижной эйлеровой регулярной квадратной сетке, расчеты ТИМ — на неструк-

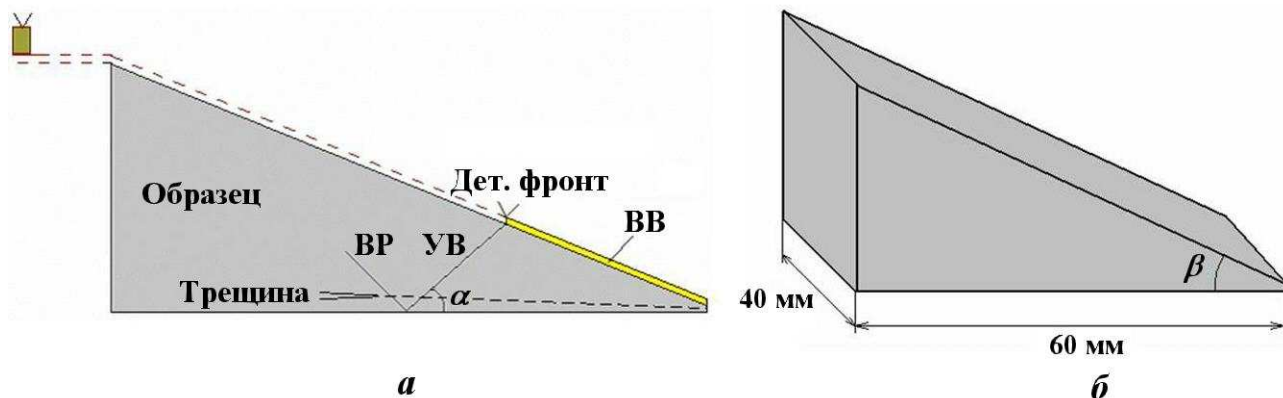


Рис. 1. Схема постановки экспериментов (*а*), геометрия и размеры образцов (*б*)



а



б



в

Рис. 2. Фотографии образцов после опытов: *а* — $h = 0,5$ мм; $\beta = 14^\circ$; *б* — $h = 0,5$ мм; $\beta = 30^\circ$; *в* — $h = 1,0$ мм; $\beta = 14^\circ$

турированной многоугольной лагранжевой сетке. Во всех расчетах размер ячеек составлял 0,05 мм (10 ячеек на толщину слоя ВВ). Выбор счетной сетки был сделан с учетом результатов предыдущих расчетов ЭГАК [15] с использованием реализации [3] кинетической модели разрушения NAG [4, 5], которые были проведены на эйлеровой квадратной счетной сетке с размером ячейки 0,15 мм. В [15] отмечалось, что ширина макротрещины составляет несколько счетных ячеек, поэтому для корректного описания процесса разрушения (и, соответственно,

для лучшего согласия расчетных и экспериментальных данных) надо использовать более мелкую счетную сетку. Для описания ПВ использовалось уравнение состояния (УРС) в форме В. Н. Зубарева [19]. Для описания сплошного материала (алюминий) использовался УРС [20, 21] и феноменологическая модель упругопластичности Б. Л. Глушака [22].

В расчетах, проведенных с помощью методики ЭГАК, использовалась реализация [3] модели изотропной кинетики вязкого разрушения NAG [4, 5], дополненной моделью необратимого уплотнения разрушенного материала по кривой компактирования [3]. В расчетах, проведенных с помощью методики ТИМ, использовалась модель изотропной кинетики вязкого разрушения [23] или модель изотропной кинетики вязкопластического разрушения [24] с модификацией [25] для учета инерции материала и расчета параметров кинетики роста и заплывания дефектов по состоянию сплошного материала; для расчета уплотнения разрушенного материала также использовалась кривая компактирования. Во всех трех моделях материал разрушается и образуется трещина при заданном значении поврежденности ω_c .

В рамках методики ЭГАК уравнение кинетики поврежденности численно интегрируется с использованием разностной схемы RWKP с повышенным запасом устойчивости [26], в рамках методики ТИМ — по явной схеме.

Во всех моделях используется скалярная функция поврежденности, влияние поврежденности на макроскопическое поведение материала учитывается следующим образом:

- УРС поврежденного материала представляется через УРС сплошного материала с помощью модели У. Херрманна [27];
- используется поправка модуля сдвига и предела текучести сплошного материала на функцию поврежденности.

В расчетах с моделями разрушения [3, 26] и [23] использовались значения их параметров для алюминия. Начальные значения поврежденности и размер дефектов в модели [24, 25] задавались в соответствии с размерами и относительным объемом пор и включений в сплаве AA5754 (американский аналог сплава АМг-6), определенными по металлографическому исследованию шлифов [28]: пористость 0,017%, относительный объем включений 0,73%, средний

диаметр включений 2,3 мкм; оценка удельного начального количества пор $\sim 5,5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ сделана по фотографии микрошлифа из [28] (рис. 3).

На рис. 4, 5 (см. также цветную вкладку) приведены поля давления, полученные в расчетах ТИМ и ЭГАК на характерные моменты времени. Фронт УВ, падающей на свободную поверхность образца, не плоский из-за разгрузки ПВ в воздух, поэтому угол α выхода УВ на свободную поверхность образца определялся двумя способами: по касательной к фронту УВ в точке отражения от свободной поверхности образца (α_1) и по секущей к фронту УВ, проведенной через

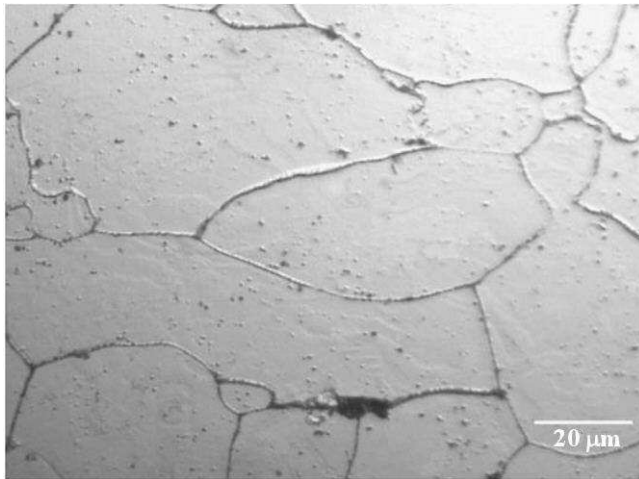


Рис. 3. Микроструктура алюминиево-магниевого сплава AA5754 [28]

точку отражения УВ от свободной поверхности образца и точку сопряжения фронта УВ в образце с фронтом детонации на нагружаемой поверхности (α_2). По результатам расчетов:

- при $\beta = 14^\circ$ $\alpha_1 = 32^\circ$, $\alpha_2 = 35^\circ$;
- при $\beta = 30^\circ$ $\alpha_1 = 13^\circ$, $\alpha_2 = 19^\circ$

(углы одинаковы в расчетах ТИМ и ЭГАК).

В таблице приведены основные результаты экспериментов с клиновидными образцами при $\beta = 14^\circ$ и $\beta = 30^\circ$ и соответствующих расчетов, где Δ — толщина откольного слоя, L — длина трещины (отсчитывается от тонкого края образца). На рис. 6 (см. также цветную вкладку) приведены поля признака состояния *разрушено/не разрушено* (в расчетах ТИМ) и концентраций разрушенного/неразрушенного материалов (в расчетах ЭГАК), полученные на момент конца счета $t = 14$ мкс. Для сравнения приведены фотографии образцов, сделанные после опытов.

Использование достаточно подробной счетной сетки с размером ячейки 50 мкм позволило рассчитать разрушение материала вплоть до образования магистральной откольной трещины. Образование магистральной трещины имело место во всех расчетах, толщина откольного слоя соответствует экспериментальному значению ~ 1 мм.

В расчетах ЭГАК с моделью разрушения NAG в реализации [3, 26] и значениями параметров,

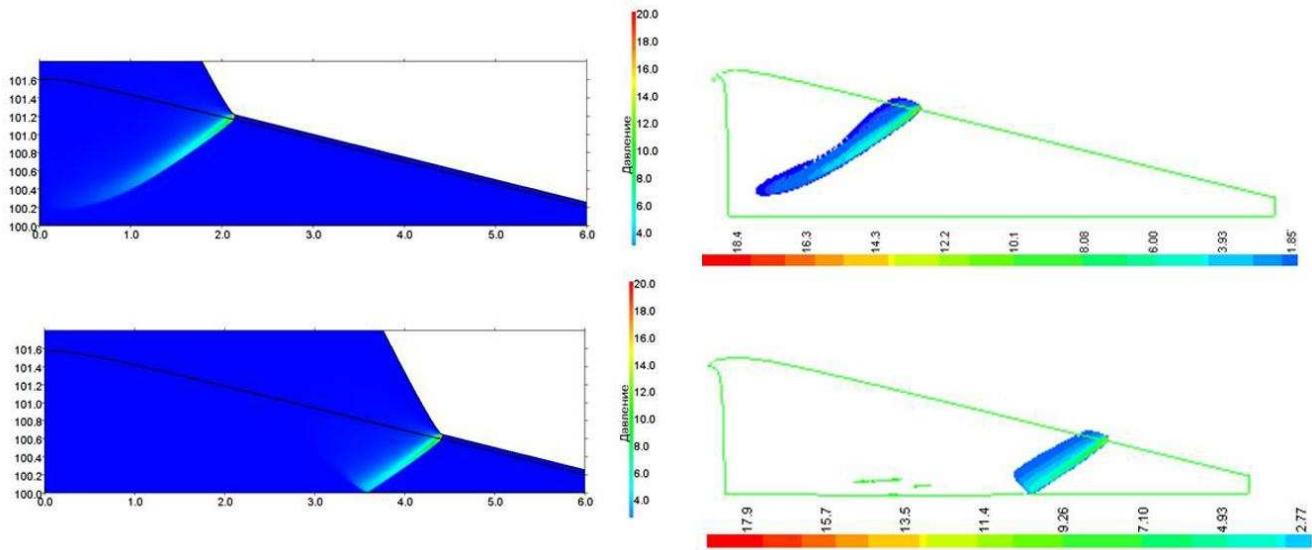


Рис. 4. Расчеты с образцом при $\beta = 14^\circ$. Поле давления (в ГПа) на характерные моменты времени $t = 6$ мкс (сверху) и $t = 9$ мкс (снизу): слева — расчет ТИМ; справа — расчет ЭГАК

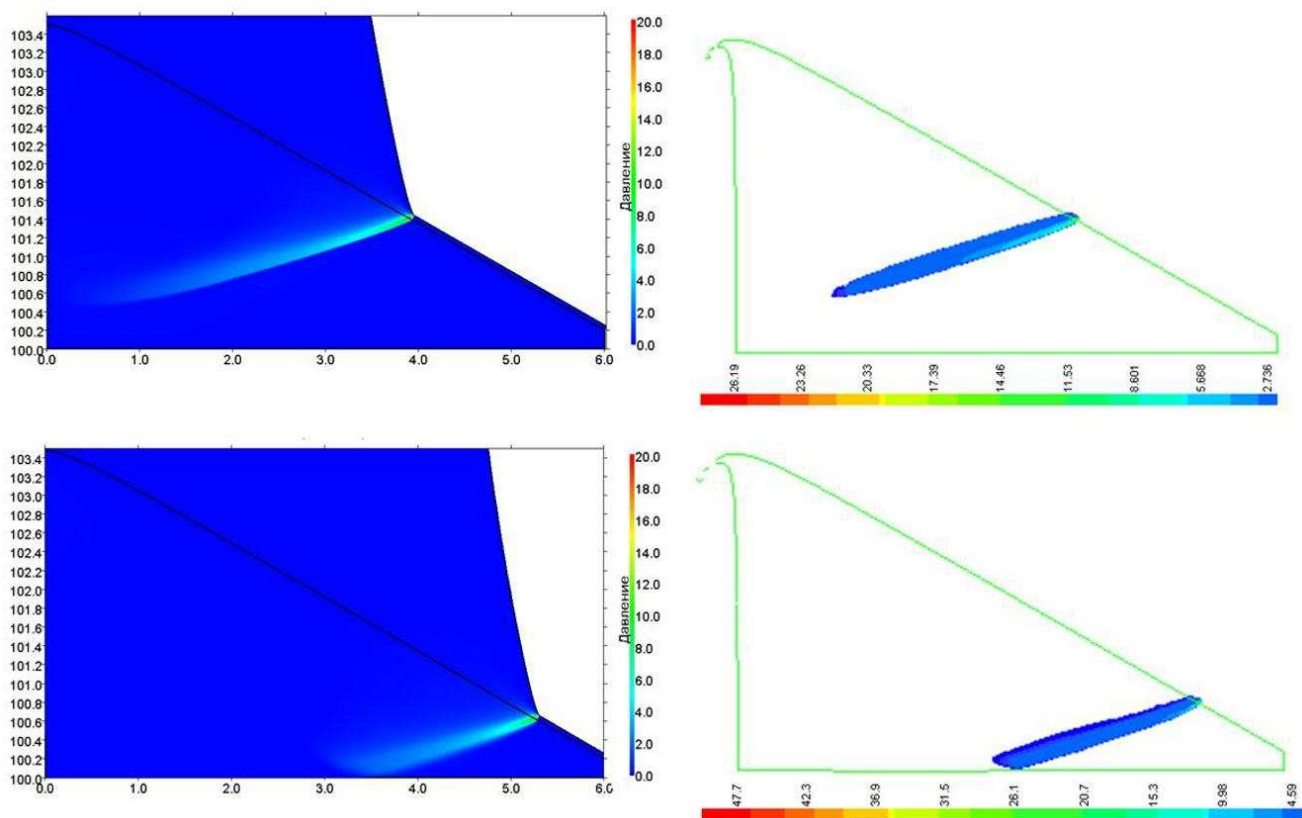


Рис. 5. Расчеты с образцом при $\beta = 30^\circ$. Поле давления (в ГПа) на характерные моменты времени $t = 9$ мкс (сверху) и $t = 11$ мкс (снизу): слева — расчет ТИМ; справа — расчет ЭГАК

Основные результаты экспериментов и расчетов

Методика	Модель разрушения	Образец с $\beta = 14^\circ$		Образец с $\beta = 30^\circ$	
		Δ , мм	L , мм	Δ , мм	L , мм
ЭГАК	[3, 26]	0,5–0,8	38,5 (44,2)*	0,5–1,4	40,2
ТИМ	[23]	0,5–1,5	38 (43)*	0,3–2,3	22 (27)*
ТИМ	[24, 25]	0,4–1,4	32,5 (40)*	0,2–2,1	23
Эксперимент		$1 \pm 0,5$	$43 \pm 0,5$	$1 \pm 0,5$	$27 \pm 0,5$

*В скобках указана суммарная длина системы трещин, не сомкнувшихся до конца счета в одну магистральную трещину.

подобранными в расчетах опытов по плоскому отколу в алюминиевых образцах, общая длина системы магистральных трещин, не сомкнувшихся до конца счета, в образце с $\beta = 14^\circ$ немного больше экспериментального значения, а длина откольной трещины в образце с $\beta = 30^\circ$ заметно больше экспериментального значения. По-видимому, для получения лучшего соответствия экспериментальным данным по разрушению алюминиевого сплава АМг-6 требуется корректировка значений параметров модели разрушения [3, 26].

В расчете ТИМ с моделью разрушения [24, 25] с единственным "подгоночным" параметром ω_c (значение поврежденности, при котором материал разрушается и образуется трещина; в расчетах $\omega_c = 0,07$) длины систем магистральных откольных трещин в обоих образцах немного меньше экспериментальных, причем наблюдаются очаги разрушения, не сомкнувшиеся в магистральные трещины.

Наилучший результат с точки зрения соответствия экспериментальным данным получился в расчетах ТИМ с моделью разрушения [23].

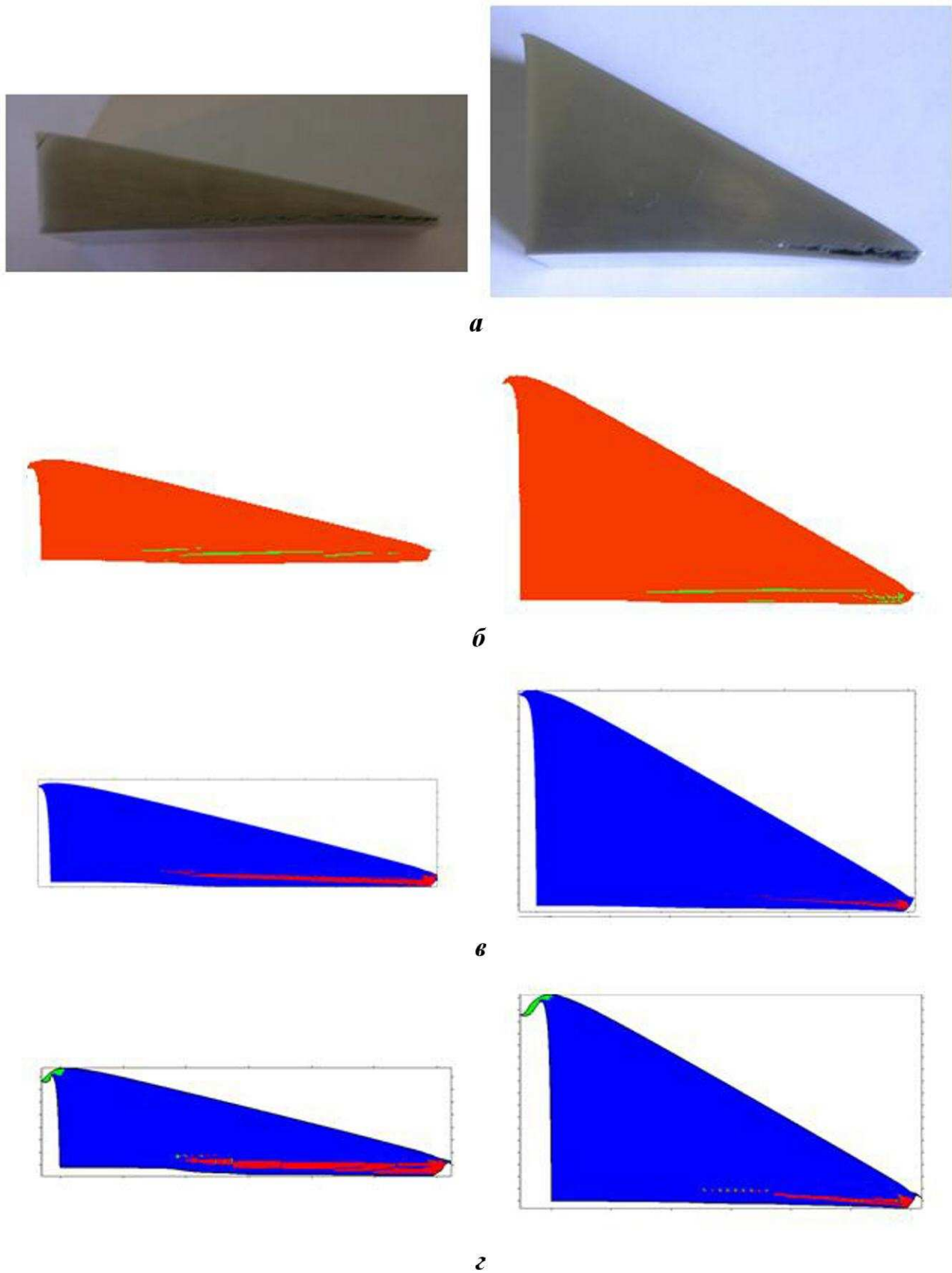


Рис. 6. Конечное состояние образцов с $\beta = 14^\circ$ (слева) и $\beta = 30^\circ$ (справа): *a* — эксперимент; *б* — расчет ЭГАК с моделью разрушения [3, 26]; *в* — расчет ТИМ с моделью разрушения [23]; *г* — расчет ТИМ с моделью разрушения [24, 25]

Заклучение

В экспериментах с нагружением клиновидных образцов из сплава АМг-6 с углом при вершине $\beta = 14^\circ$ и $\beta = 30^\circ$ скользящей детонацией слоя ВВ толщиной 0,5 мм удалось получить зарождение и развитие откольного разрушения вплоть до образования магистральной трещины. На полученных экспериментальных данных проведена валидация моделей кинетики зарождения и развития поврежденности материалов, реализованных в расчетных методиках ТИМ и ЭГАК. Результаты расчетов находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными по длине и ширине откольной трещины.

Список литературы

1. Глушак Б. Л., Новиков С. А., Рузанов А. И., Садырин А. И. Разрушение деформируемых сред при импульсных нагрузках. Нижний Новгород: ННГУ, 1992.
2. Глушак Б. Л., Трунин И. Р., Новиков С. А., Рузанов А. И. Численное моделирование откольного разрушения материалов / Фракталы в прикладной физике. Арзамас-16: ВНИИЭФ, 1995. С. 59—122.
3. Огородников В. А., Садовой А. А., Софронов В. Н. и др. Кинетическая модель пластического разрушения с учетом диссипативных процессов // Хим. физика. 2002. № 9. С. 104—109.
4. Seaman L., Curran D., Shockey A. Computational models for ductile and brittle fracture // J. Appl. Phys. 1976. Vol. 47, No 11. P. 4814—4826.
5. Curran D., Seaman L., Shockey D. Dynamic failure of solids // Phys. Reports. 1987. Vol. 47, No 5—6. P. 253—388.
6. Глушак Б. Л., Трунин И. Р., Уварова О. А. Кинетика откольного разрушения α -фазы АRМСО-железа // Хим. физика. 1998. № 2. С. 80—87.
7. Брагунец В. А., Кондрохина И. Н., Подурец А. М. и др. Экспериментальное исследование и математическое моделирование откольного разрушения и компактирования алюминия // ФГВ. 2014. № 6. С. 109—113.
8. Sofronov I. D., Rasskazova V. V., Nesterenko L. V. The use of nonregular nets for solving two-dimensional nonstationary problems in gas dynamics // Numerical Methods in Fluid Dynamics / Ed. by N. N. Yanenko and Ju. I. Shokin. Moscow: Mir Publishers, 1984. P. 82—121.
9. Соколов С. С. Методика решения нестационарных упругопластических задач на нерегулярных многогранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2002. Вып. 4. С. 23—36.
10. Софронов И. Д., Афанасьева Е. А., Винокуров О. А. и др. Комплекс программ МИМО-ЗА для решения многомерных задач механики сплошной среды на ЭВМ Эльбрус-2 // Там же. 1990. Вып. 2. С. 3—9.
11. Винокуров О. А., Змушко В. В., Плетнев Ф. А. и др. Комплекс программ МИМОЗА-99 // Там же. 1999. Вып. 4. С. 37—41.
12. Ioilev A. G., Glushak B. L., Sadovoi A. A. et al. Numerical model of ductile fracture kinetics: Comparison of results of 2-D simulations to experimental data // Int. J. Impact Eng. 2003. Vol. 29. P. 369—376.
13. Голубев В. К., Новиков С. А., Синицына Л. М. Способ испытания материалов на разрыв. Авторское свидетельство № 864050 // Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки. 1981. № 34.
14. Новиков С. А., Голубев В. К., Синицына Л. М., Юкина Н. А. О влиянии угла выхода ударной волны на свободную поверхность на образование откола в металлах // ПМТФ. 1983. № 3. С. 131—136.
15. Бурцева О. А., Герасименко В. Ф., Дреннов О. Б. и др. Исследование откольного разрушения стали, алюминия и урана при нагружении скользящей детонацией слоя ВВ / Тр. межд. конф. "XI Харитоновские науч. чтения "Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны". Саров, 16—20 марта 2009 г. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 298—304.

16. Козлов Е. А., Панкратов Д. Г., Таржанов В. И. и др. Зарождающиеся и развитые откольные повреждения клиновых образцов из сплава U-1,5% Мо при их нагружении скользящей и нормальной детонацией ВВ различной мощности и толщины // Докл. РАН. 2009. Т. 425, № 1. С. 34–39.
17. Янилкин Ю. В., Беляев С. П., Городничев А. В. и др. Комплекс программ ЭГАК++ для моделирования на адаптивно-встраиваемой дробной счетной сетке // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2003. Вып. 1. С. 20–28.
18. Соколов С. С., Воропинов А. А., Новиков И. Г. и др. Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах // Там же. 2006. Вып. 4. С. 29–44.
19. Зубарев В. Н., Евстигнеев А. А. Уравнения состояния продуктов взрыва конденсированных ВВ // ФГВ. 1984. № 6. С. 114–126.
20. Гордеев Д. Г., Гударенко Л. Ф., Каякин А. А., Куделькин В. Г. Полуэмпирическая модель уравнений состояния металлов с эффективным учетом ионизации. Часть 1. Описание модели // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2010. Вып. 3. С. 19–25.
21. Гордеев Д. Г., Гударенко Л. Ф., Каякин А. А., Куделькин В. Г. Модель уравнений состояния металлов с эффективным учетом ионизации. Уравнения состояния Та, W, Al, Be // ФГВ. 2013. № 1. С. 106–120.
22. Глушак Б. Л., Новиков С. А., Батьков Ю. В. Определяющее уравнение Al и Mg для описания высокоскоростного деформирования УВ // ФГВ. 1992. № 1. С. 84–89.
23. Соколов С. С. Феноменологическая модель кинетики развития поврежденности в твердых материалах при импульсных воздействиях // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2012. Вып. 4. С. 13–26.
24. Johnson J. N. Dynamic fracture and spallation in ductile solids // J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52, No 4. P. 2812–2825.
25. Wang Z.-P. Growth of voids in porous ductile materials at high strain rate // Ibid. 1994. Vol. 76, No 3. P. 1535–1542.
26. Калиткин Н. Н., Панченко С. Л. Оптимальные двухстадийные схемы для жестких систем // Докл. РАН. 1998. Т. 361, № 3. С. 307–310.
27. Herrmann W. Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials // J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40, No 6. P. 2490–2499.
28. Hadianfard M. J., Smerd R., Winkler S., Worswick M. Effects of strain rate on mechanical properties and failure mechanism of structural Al-Mg alloys // Materials Sci. Eng. A. 2008. Vol. 492. No 1–2. P. 283–292.

Статья поступила в редакцию 15.04.15.

NUCLEATION OF SPALL IN THE ALUMINIUM WEDGE SAMPLE UNDER THE SLIDING DETONATION LOADING: EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL SIMULATION / O. B. Drennov, A. G. Ioilev, S. S. Sokolov, V. N. Sofronov, A. L. Stadnik, T. I. Chaika, Yu. V. Yanilkin // (FSUE "RFNC-VNIIEF", SarPhTI of NNRU MEPhI, Sarov, N. Novgorod region).

Experiments on loading of aluminium wedge samples by the sliding detonation of a thin high explosive (HE) layer were performed. Two dimensional stress-strain conditions for nucleation and progress of spall fracture are produced in the experiments. Models of kine-

tics of the damage nucleation and growth and behaviour of the damaged material implemented in numerical codes TIM and EGAK were validated on results of the experiments. Results of the validation calculations are in a good agreement with the experimental length and width of the spall crack.

Keywords: detonation, shock wave, spall, crack, stress, strain, plasticity, hardening, softening, viscosity, damage, fracture, validation, numerical code TIM, numerical code EGAK.
