

поэтому возрастание параметров УВ на больших расстояниях можно объяснить только уменьшением необратимых потерь на фронте УВ. Температура воздуха на контактной поверхности с ПД в процессе расширения газового пузыря уменьшается в 2,2—2,4 раза.

Убывание параметров воздушной УВ в области  $r/r_e > 0,55$  ( $\Delta p_m < < 2p_0$ ) при любой плотности ВВ примерно одинаковое, что дает возможность ввести энергетический эквивалент относительно заряда стандартной плотности  $K_e$ , величина которого приведена в табл. 2. Связь  $K_e$  с плотностью ВВ в диапазоне  $400 \text{ кг/м}^3 \leq \rho_{10} \leq 1600 \text{ кг/м}^3$  хорошо описывается линейной зависимостью

$$(6) \quad K_e = 1 + 0,1376(1,6 - \rho_{10}/1000).$$

В диапазоне  $2 < \Delta p_m/p_0 \leq 10$  величина  $K_e$  зависит не только от плотности ВВ, но и от интенсивности УВ и подчиняется зависимости

$$(7) \quad K_e = 1 + 0,0172(10 - \Delta p_m/p_0)(1,6 - \rho_{10}/1000).$$

Введение энергетического эквивалента  $K_e$  позволяет пользоваться едиными зависимостями для параметров воздушных УВ в диапазоне  $\Delta p_m < 10p_0$  при различной плотности ВВ. Расчеты для других конденсированных ВВ указывают на применимость зависимостей (6), (7) с точностью  $\sim 1\%$ .

Таким образом, двучленное уравнение состояния для ПД и простейшая аппроксимация термодинамических свойств воздуха позволяют достаточно точно учесть плотность ВВ при расчете параметров воздушных волн.

Поступила 26 IV 1982

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Христофоров Б. Д. Параметры фронта ударной волны в воздухе при взрыве зарядов из тэна и азида свинца разной плотности. — ПМТФ, 1961, № 6.
2. Brode H. L. Blast wave from a spherical charge. — Phys. Fluids, 1959, vol. 2, N 2.
3. Фонарев А. С., Чернявский С. Ю. Расчет ударных волн при взрыве сферических зарядов ВВ в воздухе. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1968, № 5.
4. Маркин В. Т., Носенко Н. И., Сысоев Н. Н. Поле течения за нестационарной ударной волной, образующейся при взрыве сферического заряда. — Учен. зап. Центр. аэро-гидродинам. ин-та, 1979, т. 10, № 2.
5. Ждан С. А. Расчет динамической нагрузки, действующей на стенку взрывной камеры. — ФГВ, 1981, № 2.
6. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П., Челышев В. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. Изд. 2-е. М.: Наука, 1975.
7. Каширский А. В., Орленко Л. П., Охитин В. Н. Влияние уравнения состояния на разлет продуктов детонации. — ПМТФ, 1973, № 2.
8. Охитин В. Н. Влияние плотности ВВ на параметры детонации. — Труды МВТУ № 358. Вопросы физики взрыва и удара. Вып. 3. М.: изд. МВТУ, 1981.
9. Самарский А. А., Попов Ю. П. Разностные схемы газовой динамики. М.: Наука, 1975.
10. Ивандаев А. И. Об одном способе введения псевдовязкости и его применении к уточнению разностных решений уравнений гидродинамики. — ЖВММФ, 1975, т. 15, № 2.

УДК 539.4

### О ВЛИЯНИИ УГЛА ВЫХОДА УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА СВОБОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ НА ОБРАЗОВАНИЕ ОТКОЛА В МЕТАЛЛАХ

В. К. Голубев, С. А. Новиков, Л. М. Синуцына, Н. А. Юкина

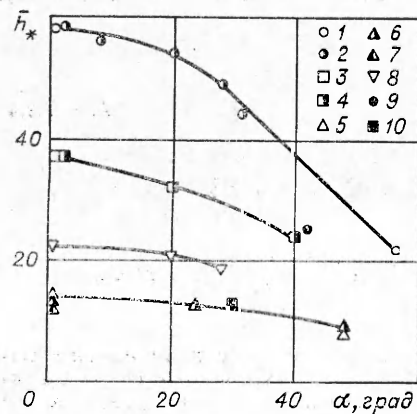
(Москва)

Исследование откольного разрушения материалов при нагружении пластин взрывом листового заряда ВВ проводилось в работах [1—3]. Возможна некоторая модификация метода, заключающаяся в использовании образца в форме пространственного клина [4]. В этом случае в единичном опыте могут быть определены критические условия нагружения, приводящие к макроскопическому откольному разрушению материала

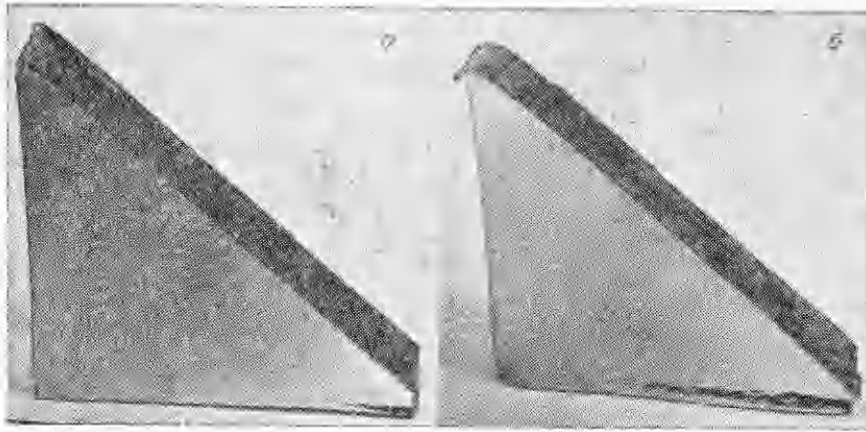
ла, а в случае необходимости и условия, соответствующие зарождению в материале откольных микроповреждений. Кроме того, изменяя величину клинообразующего угла и направление ударно-волнового нагружения, можно получить результаты по влиянию угла выхода УВ на свободную поверхность на критические условия образования откола в исследуемом материале.

В данной работе представлены некоторые предварительные результаты экспериментального исследования для алюминия АД1, алюминиевого сплава АМГ6, меди М1 и стали Ст. 3. Образцы вырезали из прутков большого диаметра в виде клиньев с различными углами  $\gamma$  при вершине. Поперечные и продольные размеры образцов выбирали достаточными для устранения влияния эффектов боковой разгрузки и начальной нестационарной зоны нагружения на процесс образования откола. Для снятия внутренних напряжений образцы из АД1 и АМГ6 отжигали при температуре 350°C, а образцы из М1 и Ст. 3 — при температуре 600°C в течение одного часа. Постановка опытов, параметры ВВ, а также используемые для расчетных оценок ударные адиабаты материалов приводились в [3]. Величину угла выхода УВ на свободную поверхность оценивали следующим образом:  $\alpha = \beta + \gamma$ , где  $\beta = \arcsin(c_0/D)$ ,  $c_0$  — коэффициент линейного  $D-u$ -соотношения,  $D$  — скорость детонации ВВ, а знаки плюс и минус соответствуют направлению нагружения от вершины и от нижнего основания клина. В опытах определяли толщину образца в месте образования макроскопической откольной трещины  $h_2$ . Значение  $h_2$  измерялось по нормали к нагружаемой поверхности клина. Полученные экспериментальные результаты приведены на фиг. 1 в виде зависимостей безразмерной критической толщины образца, соответствующей образованию откола,  $\bar{h}_* = h_2/h_1$ , где  $h_1$  — толщина слоя ВВ, от величины угла  $\alpha$ . Используемые на фиг. 1 точки означают следующее: 1, 2 — алюминий АД1,  $h_1 = 0,78$  и 0,5 мм; 3, 4 — медь,  $h_1 = 0,6$  и 0,75 мм; 5 — 7 — сталь Ст. 3,  $h_1 = 2,6$ ; 2,0 и 1,35 мм; 8 — сплав АМГ6,  $h_1 = 0,78$  мм; 9 — алюминий АД1,  $h_1 = 0,47$  мм [3]; 10 — медь,  $h_1 = 0,65$  мм [3]. Внешний вид сечения некоторых испытанных образцов приведен на фиг. 2 (а — сплав АМГ6, б — алюминий АД1,  $h_1 = 0,78$  мм) и 3 (сталь Ст. 3, а —  $\alpha = 24^\circ$ , б —  $\alpha = 48^\circ$ ,  $h_1 = 2,0$  мм).

Для всех исследуемых материалов наблюдается тенденция к снижению значения  $\bar{h}_*$  при увеличении угла  $\alpha$ . Это, в свою очередь, указывает, что увеличение угла  $\alpha$  приводит к увеличению критического давления  $p_*$  в ударной волне, необходимого для образования откола. Попытаемся сделать ориентировочные оценки давления  $p$  в ударной волне, возбуждаемой скользящей детонацией слоя ВВ, в зависимости от глубины ее прохождения в исследуемых металлах  $h$ . На фиг. 4 в безразмерных координатах  $\bar{p} = p/p_0$ , где  $p_0 = \rho D^2/4$  — давление Жуге, и  $\bar{h} = h/h_1$  приведены необходимые для этого данные. Обозначения 1 и 2 соответствуют результатам гидродинамического расчета затухания ударных волн в стали и алюминии [3], 3 — экспериментальные результаты для стали Ст. 3 [2] и 4 — экспериментальные результаты для алюминиевого сплава АМц [1]. Нижняя шкала  $\bar{h}$  соответствует алюминию, верхняя — стали. Если для алюминия гидродинамический расчет дает довольно удовлетворительное описание затухания ударной волны при  $\bar{h} < 20$ , то для стали Ст. 3, обладающей значительной сдвиговой прочностью, наблюдается существенное различие расчетных и экспериментальных результатов. Экспериментальные результаты 3 и 4 в диапазонах изменения  $\bar{h}$  (1—7) и (1—30) могут быть аппроксимированы произво-



Ф и г. 1



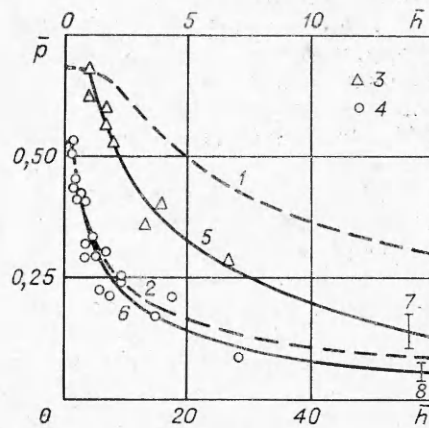
Ф и г. 2



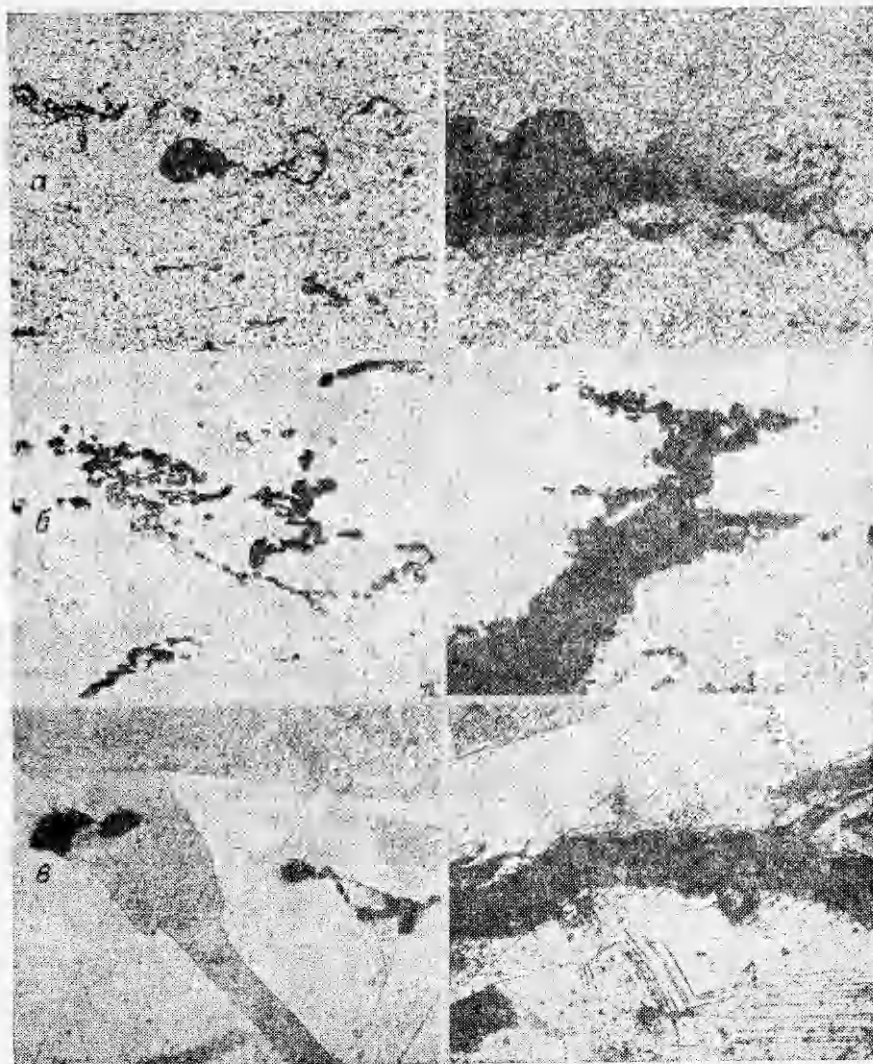
Ф и г. 3

льными монотонно спадающими зависимостями  $\bar{p}(\bar{h})$  5 и 6 соответственно. Экстраполируем эти зависимости до значений  $\bar{h} = 15$  и 60 для стали и алюминия. Для этого примем некоторые дополнительные предположения. Во-первых, для реальной зависимости  $\bar{p}(\bar{h})$  должен наблюдаться более существенный спад по сравнению с гидродинамическим расчетом, т. е. расстояние между ними должно увеличиваться с увеличением  $\bar{h}$ . Во-вторых, предположим, что зависимости 5 и 6 проходят через вилки 7 и 8, верхние пределы которых соответствуют критическим условиям макроскопического откольного разрушения стали Ст. 3 и алюминия АД1 в условиях нормального падения УВ на свободную поверхность [5], а нижние соответствуют полученным в дальнейшем критическим условиям зарождения в этих материалах откольных микрповреждений. Для меди расчетная зависимость  $\bar{p}(\bar{h})$  в гидродинамическом приближении фактически совпадает с расчетной зависимостью для стали. Учитывая меньшую сдвиговую прочность меди, приемлемо предположить, что зависимость  $\bar{p}(\bar{h})$  для меди будет расположена несколько выше зависимости 5 для стали, а учет ее монотонности и прохождения через аналогичным образом построенную вилку позволяет сделать хотя бы сравнительные оценки  $p_*$  для различных углов  $\alpha$ .

Проведенные таким образом оценки влияния угла  $\alpha$  на значения  $p_*$  показывают, что увеличение угла  $\alpha$  от 0 до  $56^\circ$  приводит к увеличению  $p_*$  для алюминия от 1,4 до 3,0 ГПа. Для алюминиевого сплава АМг6 значение  $p_*$  при  $\alpha = 0^\circ$  должно быть несколько меньше 3,0 ГПа (затухание УВ в



Ф и г. 4



Ф и г. 5

прочном сплаве АМг6 должно быть сильнее, чем в пластичном АМц), а при  $\alpha = 28^\circ$   $p_*$  увеличивается до 3,5 ГПа. Для стали Ст. 3 увеличение угла  $\alpha$  от 0 до  $48^\circ$  приводит к увеличению  $p_*$  от 3,3 до 5,0 ГПа, а для меди увеличение  $\alpha$  от 0 до  $40^\circ$  приводит к увеличению  $p_*$  от 3,0 до 3,9 ГПа.

Проведен также металлографический анализ характера откольного разрушения исследуемых металлов. На фиг. 5 ( $\times 200$ ) слева приведен вид зарождающихся микроповреждений, а справа — начальная стадия образования макроскопических откольных трещин в алюминии (а), сплаве АМг6 (б) и меди (в). На фиг. 6 приведены результаты для стали Ст. 3: а — интенсивное двойникование зерен феррита в тонком ( $\sim 1$  мм при  $h_1 = 2,0$  мм) слое у поверхности нагружения,  $\times 500$ ; б — зарождающиеся микротрещины,  $\times 500$ ; в — начальная стадия образования откольной макротрещины,  $\times 200$ .

На фиг. 7 приведены результаты измерения твердости по Виккерсу некоторых испытанных образцов: 1 — алюминий,  $h_1 = 0,78$  мм; 2 — сплав АМг6,  $h_1 = 0,78$  мм; 3 — медь,  $h_1 = 0,6$  мм; 4 — сталь Ст. 3,  $h_1 = 2,0$  мм. Измерения проводили при нагрузке 50 Н. В каждой точке измеряли не менее семи отпечатков. Твердость материалов в исходном состоянии составляла 19,5; 82; 49 и 124 ГПа соответственно.

Отметим некоторые особенности полученных в работе результатов.



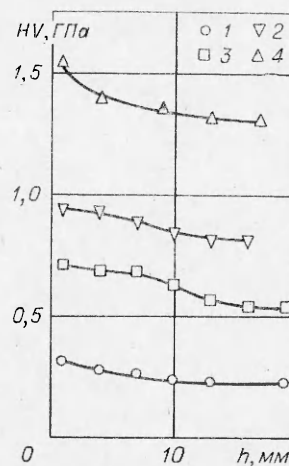
Фиг. 6

Налицо явная тенденция увеличения критического давления в ударной волне, вызывающего откольное разрушение исследуемых металлов. Для объяснения наблюдаемого явления представляется целесообразным провести исследование влияния угла выхода УВ на критические условия зарождения в материалах откольных микроповреждений, а полученные результаты использовать для расчетного моделирования процесса косоугольного отражения, учитывая реальные упругопластические свойства исследуемых металлов, а также кинетику накопления откольных повреждений и ее влияние на характер волновых процессов в разрушающемся материале.

Определенный интерес представляет вопрос о влиянии легирующих добавок на прочность металлов при отколе. На фиг. 2 приведен вид образцов из алюминия АД1 и алюминиевого сплава АМг6 (основной легирующий элемент — магний), нагружавшихся взрывом листового заряда одинаковой толщины. Видно, что материалы обладают существенно различными сопротивлениями макроскопическому откольному разрушению, что наблюдалось также в работе [5], тогда как зарождение микроповреждений в обоих материалах происходит при примерно одинаковом уровне нагружения ( $\sim 1,0$  ГПа).

Наблюдается также существенное влияние термообработки на сопротивление металлов откольному разрушению. Для примера на фиг. 1 нанесены точки 9 и 10 из работы [3], где образцы не подвергались предварительной термообработке. Сделанные оценки указывают, что проведенная термообработка привела к снижению значений  $p_*$  для алюминия и меди на 25 и 40%.

Результаты проведенного металлографического анализа показывают, что зарождение откольного разрушения в алюминии, сплаве АМг6 и меди (см. фиг. 5) имеет вязкий характер. Микроповреждения представляют собой поры произвольной формы и небольшие вязкие микротрещины, тогда как в [6], например, зарождающиеся в алюминии и меди микроповреждения имели вид пор сферической формы. В сплаве АМг6 микроповреждения образуются на скоплениях включений, а в алюминии и меди — в произвольных местах структуры. Слияние большого числа микроповреждений приводит к образованию вязких мак-



Фиг. 7

ротрещин. Наблюдаемая в стали Ст. 3 (см. фиг. 6) зона интенсивного двойникования феррита обусловлена обратимым фазовым переходом  $\alpha$ -железа в  $\epsilon$ -фазу при давлениях свыше 13 ГПа. Зарождение откольного разрушения в стали Ст. 3 в виде микротрещин имеет хрупкий характер, а развитие макротрещины происходит уже более вязким образом, что наблюдалось также в [7].

Результаты измерения твердости указывают в общем-то на довольно незначительный эффект ударно-волнового упрочнения исследуемых металлов. Например, для меди при давлении  $\sim 15$  ГПа, близком к давлению у поверхности нагружения, согласно анализу большого числа экспериментальных работ, выполненному в [8], твердость увеличивается до 0,9—1,0 ГПа, тогда как в данной работе только до 0,7 ГПа. Подобные различия наблюдаются и для других металлов. Объяснением, по-видимому, может служить тот факт, что в данной работе массивные образцы нагружались взрывом тонкого листового заряда ВВ, являющегося относительно низкоинтенсивным и локализованным источником нагружения. Поэтому деформации, обусловленные осадкой и изгибом образцов, были сведены к минимуму, а их вклад во взрывное упрочнение является, по-видимому, весьма существенным.

Поступила 5 III 1982

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ментешов Е. В., Ратников В. П. и др. Действие взрыва листового заряда ВВ на алюминиевую пластину.— ФГВ, 1967, № 2.
2. Рыбаков А. П., Ментешов Е. В., Шавков В. П. Действие взрыва листового заряда ВВ на металлические пластины.— ФГВ, 1968, № 1.
3. Голубев В. К., Новиков С. А., Сеницына Л. М. О разрушении материалов при нагружении взрывом листового заряда ВВ.— ПМТФ, 1981, № 2.
4. Голубев В. К., Новиков С. А., Сеницына Л. М. Способ испытания материалов на разрыв.— Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1981, № 34.
5. Голубев В. К., Новиков С. А. и др. Влияние температуры на критические условия откольного разрушения металлов.— ПМТФ, 1980, № 4.
6. Barbee T. W., Seaman L. et al. Dynamic fracture criteria for ductile and brittle metals.— J. Materials, 1972, vol. 7, N 3.
7. Голубев В. К., Новиков С. А. и др. О механизмах откольного разрушения сталей Ст. 3 и 12Х18Н10Т в температурном диапазоне — 196... 800°C.— Проблемы прочности, 1981, № 5.
8. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.

УДК 620.178.7 + 620.171.3 + 539.4.019

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ РАЗРУШАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОТКОЛЕ В МЕДИ, НИКЕЛЕ И ТИТАНЕ

С. А. Новиков, А. П. Погорелов, В. А. Сеницын  
(Москва)

В большинстве экспериментальных исследований разрушающих напряжений при отколе (откольной прочности)  $\sigma_{отк}$  характерное время нагружения  $\tau$  составляло  $\sim 10^{-6}$  с. В ряде работ [1, 2] отмечается, что при действии импульсов такой длительности величина откольной прочности практически не зависит от  $\tau$ . Делается заключение [3, 4], что долговечность  $\tau \approx 10^{-6}$  с является предельным значением времени действия нагрузки, ниже которого не происходит откольного разрушения.

Известно, что в диапазоне долговечности  $10^{-4}$ — $10^{-6}$  с прочность материалов  $\sigma$  значительно превышает соответствующие величины, вычисляемые по уравнению

$$(1) \quad \tau = \tau_0 \exp[(u_0 - \gamma\sigma)/kT],$$

содержащего постоянную Больцмана  $k$  и постоянные параметры материала:  $\tau_0$ ,  $u_0$ ,  $\gamma$ . Наклон динамической ветви временной зависимости прочности в полулогарифмических координатах  $\lg \tau$ — $\sigma$  значительно меньше наклона квазистатической. Значение