

МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ УДАРНО-СЖАТЫХ МЕТАЛЛОВ

В. В. Мохова^{a,b}, А. Л. Михайлов^a, А. В. Тильжунов^{a,b}, Н. И. Орлов^b, Л. И. Канунова^a,
В. А. Брагунец^a, М. И. Ткаченко^a, В. Г. Симаков^a, С. С. Соколов^a, А. М. Подурец^{a,b}*

*^a Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
607188, Саров, Нижегородская обл., Россия*

*^b Саровский физико-технический институт —
филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»
607180, Саров, Нижегородская обл., Россия*

Поступила в редакцию 19 февраля 2015 г.

Приведены результаты исследования механизмов выброса алюминия и меди со свободной поверхности при выходе на нее ударной волны умеренной интенсивности. На свободной поверхности образцов нанесены искусственные углубления, имитировавшие в увеличенном масштабе (10 : 1) естественную шероховатость поверхности после механической обработки (глубина углублений 0.7–0.9 мм). Давление ударно-волнового импульса у основания возмущений варьировалось в интервале $P = 5\text{--}20$ ГПа, ниже области плавления, длительность импульса давления составляла 0.02, 0.2, 1 мкс. При анализе свободной поверхности постопытных образцов установлено, что при определенных параметрах нагружения и шероховатости поверхности выброс металла из вершин выступающих гребней или пирамид в результате продольных разрушений на порядок превышает выброс металла из углублений в виде кумулятивных струй. Для определения количественных показателей выброса металла и распределения по размерам частиц использовались методы «мягких улавливающих мишеней» и измерения потери массы образца в результате разрушения.

DOI: 10.7868/S004445101512010X

1. ВВЕДЕНИЕ

Понимание природы процессов разрушения (потери устойчивости и последующего выброса металла) на свободной границе образцов, точнее на границе металл–воздух, под действием ударной волны важно для обоснования и обеспечения работоспособности различных конструкций, например мишеней инерциального термоядерного синтеза [1].

В работе исследуются механизмы выброса микрочастиц со свободной поверхности образцов металла при выходе на нее из образца ударной волны умеренной интенсивности, связанные с шероховатостью поверхности, которую в упрощенном виде можно представить в виде углублений и выступающих клиньев (гребней) или пирамид — явления, получившего в

литературе название «пыление» или «эжекция частиц» [2]. Образцы, на поверхности которых были нанесены возмущения в виде пирамидок, были представлены А. Я. Учаевым, инициатором исследования процессов разрушения свободной поверхности при коротких временах нагружения [3].

В процессе разрушения на свободной поверхности с шероховатостью существенную роль должны играть кумулятивные струи, откольные явления, возникающие при встрече волн разгрузки со свободных поверхностей образца и ударника (поперечный откол), и разрушения, вызванные растяжением при встрече волн разгрузки, отраженных от граней клина (гребня или пирамиды) [4].

Необходимо более подробно рассмотреть процессы разрушения в гребне или клине.

При выходе фронта ударной волны на свободную поверхность под углом к поверхности из точки выхода распространяется волна разрежения. В акустиче-

*E-mail: vvmokhova@yandex.ru

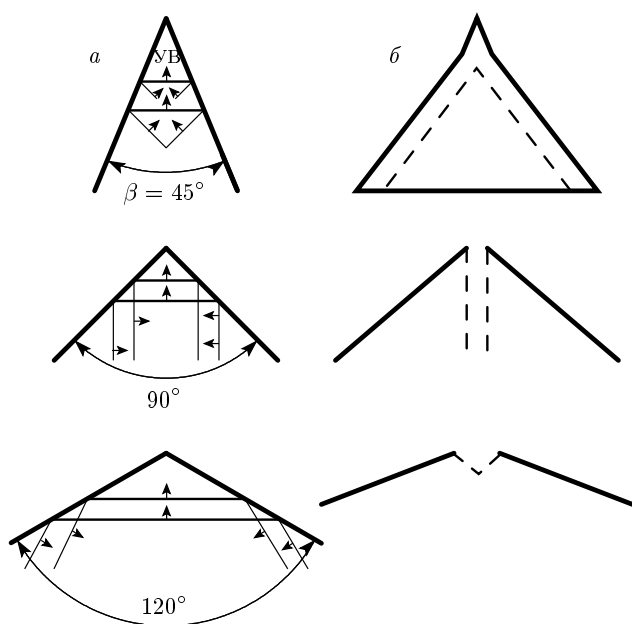


Рис. 1. а) Схема прохождения ударной волны по клину; б) форма свободной поверхности и область разрушения клина при углах клина $\beta = 45^\circ, 90^\circ, 120^\circ$

ском приближении скорости ударной волны и волны разрежения одинаковы и угол падения равен углу отражения.

При встрече волн разрежения, отраженных от граней клина, на вертикальной оси симметрии клина возникают растягивающие напряжения. Когда растягивающие напряжения превышают величину откольной прочности, происходит разрушение материала.

На рис. 1 показаны волны разрежения и форма разрушения при выходе ударной волны на двугранный угол β [4]. На рисунке сплошные линии — фронт ударной волны, тонкие линии — фронт волны разгрузки, стрелки — направление распространения, штриховые линии — форма разрушения в клине.

В волнах разгрузки, распространяющихся со свободной поверхности клина (граней клина с естественной шероховатостью при механической обработке), проекции массовой скорости внутри клина в продольном направлении (параллельном высоте клина) и поперечном направлении (перпендикулярном высоте клина) зависят от величины двугранного угла β клина. Соответственно, степень, скорость, положение зарождения разрушения в клине и выброс металла зависят от угла β у вершины клина.

При $\beta < 90^\circ$ волны разрежения встречаются ниже плоскости основания пирамид. Разрушение ме-

талла, «трещина» начинается в глубине образца и поднимается вслед за ударной волной. При $\beta > 90^\circ$ волны разрежения встречаются после выхода ударной волны на вершину угла. Разрушение металла начинается с вершины и распространяется в глубь клина [4]. При $\beta = 90^\circ$ в акустическом приближении волны разрежения встречаются по всей высоте пирамиды в момент выхода ударной волны на вершину угла. Разрушение металла начинается одновременно по всей плоскости симметрии на линии биссектрисы угла.

При взаимодействии сил растяжения, вызывающих поперечный откол и трещины внутри клина или пирамиды, разрушения и выброс материала могут быть значительными. На рис. 2 схематично показаны полученные численным моделированием поперечный откол, продольные разрушения в клине и кумулятивные струи.

Цель работы — экспериментальное подтверждение сформулированных выше качественных представлений и изучение механизмов ударно-волнового разрушения свободных поверхностей металлов в области умеренных воздействий, ниже области проявления гравитационных неустойчивостей (Рэлея — Тейлора и Рихтмайера — Мешкова). Мы не рассматриваем влияния микроструктуры материала и гетерогенности течения при его деформировании.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для имитации в увеличенном масштабе естественной шероховатости поверхности после механической обработки в данной работе использовались образцы из алюминия марки 04 (99.99 % Al) и меди марки М1 в виде дисков или пластин толщиной H (1.45–2.00 мм), на свободной поверхности которых были нанесены периодические углубления в виде параллельных полос (на поверхности — выступающие гребни) или перпендикулярно пересекающихся полос (на поверхности — выступающие пирамиды) с различными глубинами a (0.70–0.97 мм) и периодом λ (0.8–3.5 мм) между углублениями. Двугранный угол β у вершины гребня или пирамиды, образованный противоположными гранями пирамиды или гребня, изменяли от 45° до 136° . На рис. 3 показаны фотографии поверхности образцов Al в увеличенном масштабе.

Для экспериментального исследования процессов разрушения при высоких скоростях деформирования использовали электровзрывную установку (электропушку) [5], разгоняющую энергией электро-

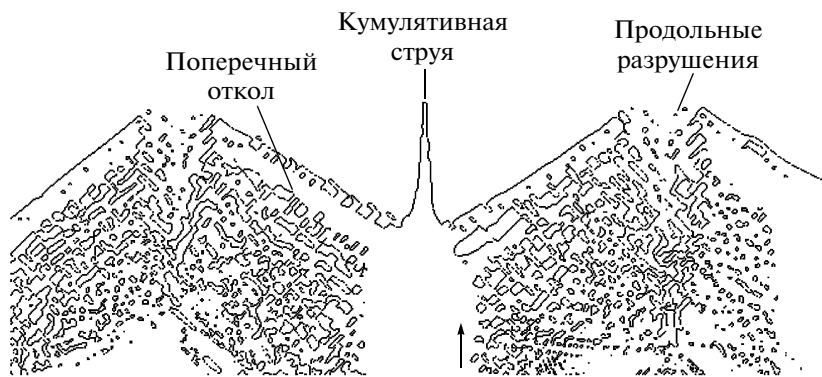


Рис. 2. Виды разрушений свободной поверхности образца с периодическими углублениями; стрелкой указано направление движения ударной волны в образце

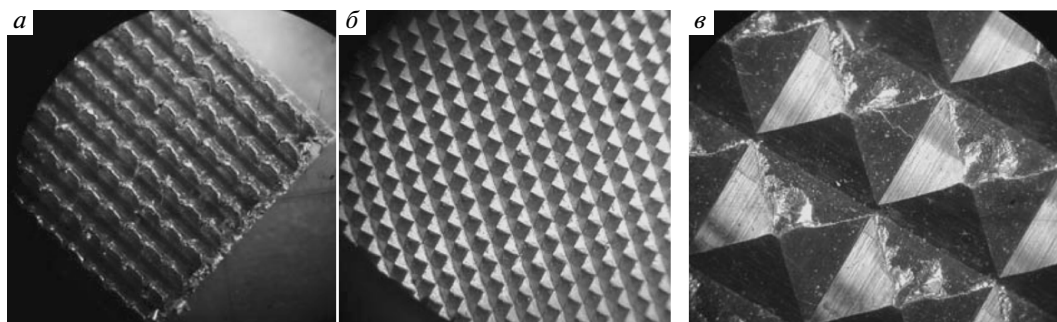


Рис. 3. Фотографии поверхности исходных образцов: *a* — $\beta = 45^\circ$ ($a = 0.97$ мм, $\lambda = 0.8$ мм, $H = 1.55$ мм); *б* — $\beta = 90^\circ$ ($a = 0.71$ мм, $\lambda = 1.43$ мм, $H = 1.35$ мм); *в* — $\beta = 136^\circ$ ($a = 0.7$ мм, $\lambda = 3.5$ мм, $H = 2$ мм)

взрыва алюминиевой фольги тонкие диэлектрические ударники до скоростей 8 км/с. Использование диэлектрических ударников различной толщины позволило варьировать скорости полета ударника: скорость полета ударника из оргстекла толщиной 1 мм достигала 2.7 км/с, а ударника из лавсана толщиной 110 мкм — 6.7 км/с. При этом соответственно изменялась длительность импульса нагружения ступенчатой формы. Площадь ударника 32×80 мм². Скорость и симметрию полета ударника на электропушке контролировали с помощью фотохронографа [5], погрешность измерения скорости составляла 5%. Применение электровзрывной пушки по сравнению с системами на основе взрывчатых веществ позволяет избежать фугасного воздействия, разрушающего исследуемый образец и делающего его малоприменимым для дальнейшего постопытного анализа.

Результаты анализировались по микро- и макрофотографиям свободной поверхности образцов, сохраненных после ударно-волнового нагружения.

Для определения количественного выброса металла при разрушении свободной поверхности использовался метод «мягких мишеней», который заключался в улавливании выброшенных частиц пластиной полиэтилена, расположенной на расстоянии 1 мм от поверхности образца, на которую нанесены углубления.

Схема эксперимента показана на рис. 4. При соударении ударников толщиной (0.11 и 1.00 мм) с образцами период времени постоянного течения при подходе ударной волны к границе образца равнялся соответственно 0.02 мкс и 0.2 мкс. В дальнейшем этот период будем называть длительностью нагружения.

Нагружение малой длительности (0.02 мкс) реализовали при торможении ударника из лавсана толщиной $d = 110$ мкм, разогнанного энергией электровзрыва алюминиевой фольги до скорости $w = 6.7$ км/с, на образце, на свободной поверхности которого нанесены искусственные углубления. Импульс давления имеет треугольную фор-

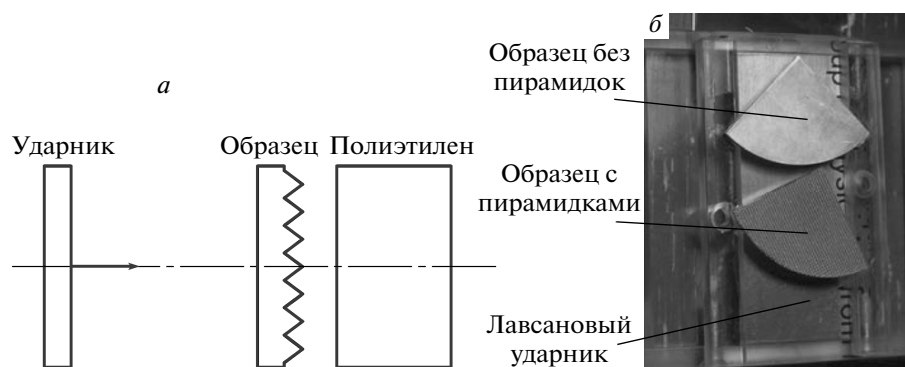


Рис. 4. а) Схема эксперимента (стрелкой указано направление полета ударника); б) фотография блока метания с образцами из алюминия без полиэтилена (вверху образец без искусственной шероховатости, внизу — с гребнями ($\beta = 45^\circ$))

му вследствие действия догоняющей волны разгрузки с убывающей амплитудой по мере распространения волны. Нагружение образцов «условно столбовым» импульсом давления длительностью 0.2 мкс реализовали с помощью ударника из оргстекла толщиной 1.0 ± 0.1 мм, разогнанного до скорости 2.50–2.75 км/с.

В некоторых опытах с электропушкой размеры образца превышали ширину ударника, тем более ширину плоской части соударения ударника и образца. (Скорость периферии (краев) ударника ниже скорости его центральной плоской части [5].) Фотоснимки свободной поверхности образца, которая либо не подвергалась ударно-волновому воздействию, либо оказалась в зоне более низких давлений, позволили наблюдать развитие разрушения по мере изменения давления.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Разрушение поверхности образцов при нагружении треугольным импульсом давления длительностью 0.02 мкс

На рис. 5 показаны снимки свободной поверхности постопытных алюминиевых образцов с различными углами β у вершин гребней ($\beta \approx 45^\circ$) или пирамид ($\beta \approx 90^\circ, 136^\circ$) после соударения с тонким лавсановым ударником толщиной 0.11 мм.

На фотографии 5а свободной поверхности постопытного алюминиевого образца с углами $\beta \approx 45^\circ$ при вершине гребня видно, что разрушения свободной поверхности незначительны. Выталкивание металла начинается в углублениях (обнаружены тонкие трещины — следы кумулятивных струй) при од-

новременном «разбухании» гребней за счет тонкого поперечного откола на гранях гребней, вершины гребней не разрушены. В этом же опыте на поверхности образца без углублений образуется откол поверхностного слоя (около 0.1 мм), следы которого можно наблюдать на свободной поверхности.

При тех же условиях нагружения на свободной поверхности алюминиевых образцов с углами $\beta \approx 90^\circ$ при вершине пирамид разрушения значительны, вплоть до прободения образца (рис. 5б).

На периферии образца, которая либо не подвергалась ударно-волновому воздействию, либо оказалась в зоне более низких давлений, можно наблюдать развитие разрушения по мере увеличения давления (рис. 5в). Разрушение начинается на ребрах и вершинах пирамид с большим выбросом металла. Одновременно наблюдается «выпучивание» металла из углублений. В тех случаях, когда по тем или иным причинам разрушения внутри клина не наблюдаются, заметны следы формирования кумулятивных струй в углублениях¹⁾.

На свободной поверхности образцов с углом 136° при вершинах пирамид (рис. 5г) разрушение также начинается на ребрах и вершинах пирамид (продольная трещина), но, видимо, происходит не достаточно глубоко. Решающим разрушением оказывается поперечный откол, при котором отлетает верхний слой образца, почти как в случае с образцом без искусственных возмущений.

¹⁾ В этом случае релаксация напряжений происходит за счет подъема «кумулятивного» материала. При коротких временах нагружения, высоких скоростях деформации величина откольной прочности увеличивается в разы и не происходит отрыва металла в кумулятивных струях.

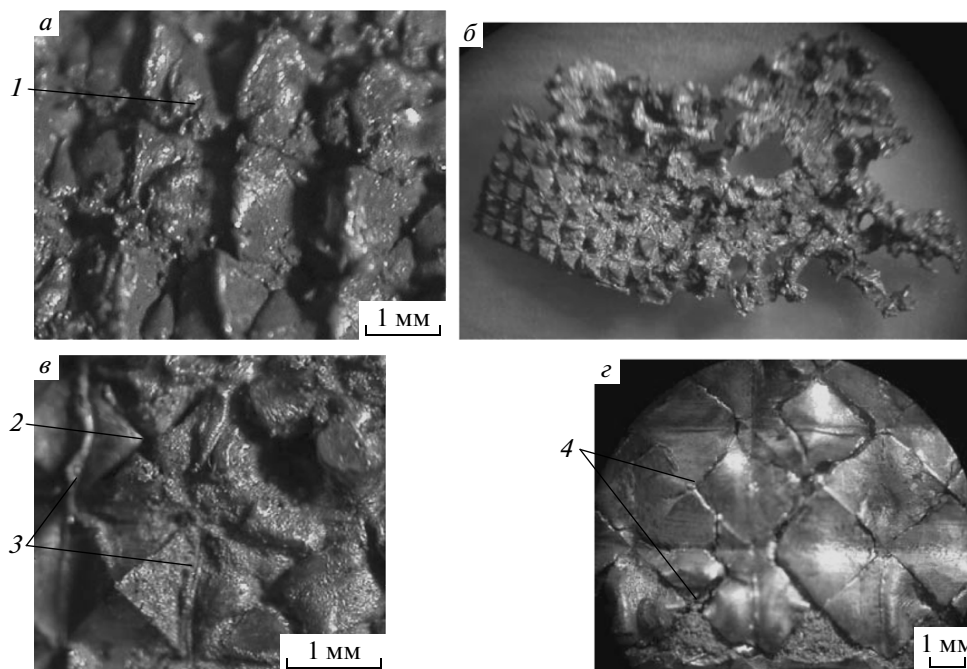


Рис. 5. Фотографии свободной поверхности постопытных образцов алюминия после соударения с ударником толщиной 0.11 мм (скорость полета ударника $w = 6.7$ км/с): $a - \beta = 45^\circ$ (1 — разбухание граней (следы поперечного откола)); $б, в - \beta = 90^\circ$ (2 — выброс металла из вершин пирамид (результат продольного разрушения), 3 — следы формирования кумулятивных струй); $г - \beta = 136^\circ$ (4 — бывшие вершины пирамиды)

3.2. Разрушение поверхности образцов при нагружении «столообразным» импульсом давления длительностью 0.2 мкс

Определенный интерес представляет то, как происходит взаимодействие волн разгрузки и разрушение поверхности при нагружении условно «столообразным» импульсом давления длительностью 0.2 мкс. Толщина ударника из оргстекла 1 мм, скорость полета ударника 2.57 км/с. Толщина откольного слоя в образце близка к глубине шероховатости на поверхности (рис. 6). Анализ разрушений свободной поверхности постопытных образцов после нагружения импульсом давления длительностью 0.2 мкс показал, что характер разрушений примерно тот же, как и при короткой длительности 0.02 мкс.

В образцах с углом $\beta \approx 45^\circ$ у вершины гребня выброс металла идет из углублений как за счет поперечного откола, так и за счет кумулятивных струй (тонкие трещины в углублениях). На вершинах гребней сохраняются неотлетевшие слои металла (рис. 6а).

В образцах с углом $\beta \approx 90^\circ$ у вершины пирамиды происходит прободение образца за счет выброса металла из вершин пирамид в виде воронки, а так-

же подъем «кумулятивного» металла из углублений без следов отрыва кумулятивной струи (рис. 6б).

В образцах с углом $\beta \approx 136^\circ$ у вершины пирамиды также происходит продольное разрушение и выброс металла по оси и по ребрам пирамиды, а также подъем «кумулятивного» металла из углублений, но не отрыв из углублений. На месте вершин пирамид появляются отверстия, по форме напоминающие усеченную пирамиду Трещин от кумулятивных струй не зафиксировано. При этом наблюдается и поперечный откол. На рис. 6в показана только верхняя, отлетевшая часть образца.

Сравнение форм разрушений пирамид и гребней, рассчитанных по численной модели разрушения, с экспериментально регистрируемыми формами (см., например, рис. 6в), позволит тестировать разрабатываемые модели разрушения.

3.3. Разрушение поверхности образцов с искусственно нанесенными двумерными возмущениями в виде гребней

Пирамиды — не самый распространенный вид шероховатости после механической обработки. Поэтому были проведены подобные опыты с образца-

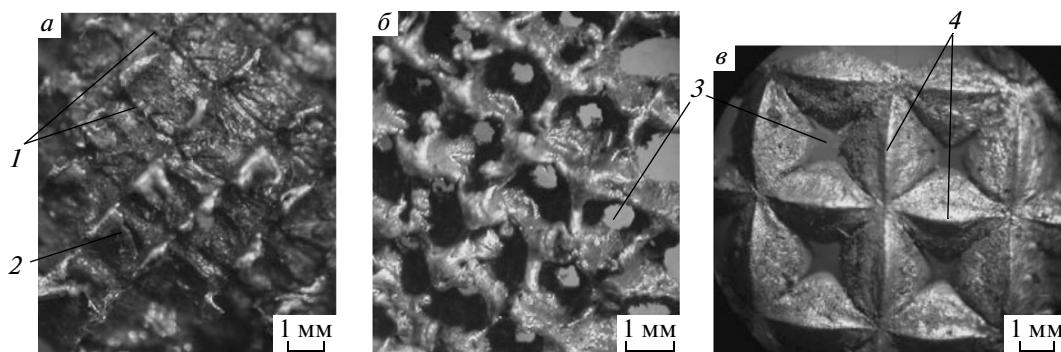


Рис. 6. Фотографии свободной поверхности постопытных образцов после нагружения ударником из оргстекла толщиной 1 мм: *a* — $\beta \approx 45^\circ$ (1 — следы кумулятивных струй, 2 — неотлетевшие куски поперечного откола); *b* — $\beta \approx 90^\circ$ (3 — результат продольного разрушения из вершин пирамид); *v* — $\beta \approx 136^\circ$ (4 — следы формирования кумулятивных струй)

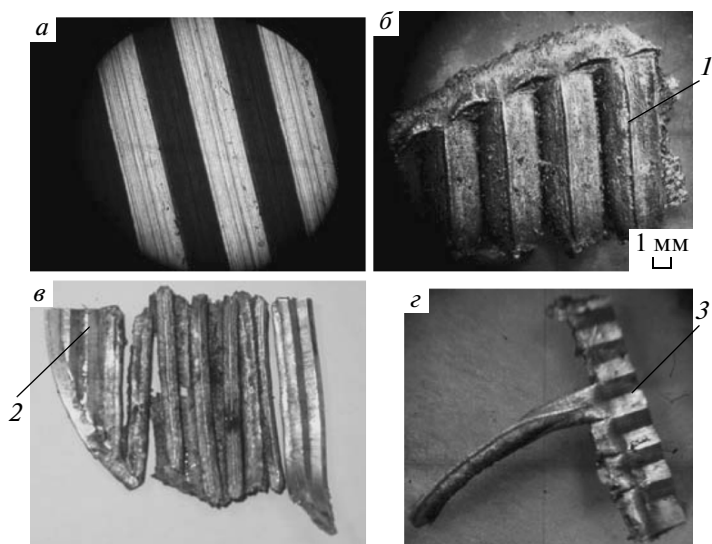


Рис. 7. Фотографии поверхности исходного (*a*) и постопытных (*б, в, г*) образцов после нагружения ударником из оргстекла толщиной 1 мм ($w = 2.57$ км/с): (1 — следы формирования кумулятивных струй; 2, 3 — ненагруженная (исходная) часть)

ми, на поверхности которых искусственно были нанесены углубления в виде гребней с углом при вершине гребня $\beta \approx 136^\circ$ ($a = 0.7$ мм, $\lambda = 3.5$ мм, $H = 2$ мм) (рис. 7*a*).

На рис. 7*б* показан образец из алюминия после соударения с ударником из оргстекла толщиной 1 мм с разбухшими «батонами» — «кумулятивным» материалом, поднявшимся из углублений. Чаще всего разбухшие «батоны» отлетали от подложки за счет поперечного откола (рис. 7*в*).

На рис. 7*г* представлена фотография постопытного образца, на котором сохранилась ненагруженная часть (расположенная вне воздействия ударника) и неотлетевшая нагруженная часть образца. Из этого рисунка хорошо видно, что выброс металла и продольное разрушение металла происходили из вершин исходных гребней, а из углублений между гребнями поднимался «кумулятивный» материал. Возможно, на вершине «батона» (бывшего углубления) остались следы формирования кумулятивных струй (рис. 7*б*), но мы предполагаем, что по причине продольного разрушения кумулятивные струи так и не возникли.

3.4. Разрушение свободной поверхности образцов при столкновении с толстым ударником

В предыдущих условиях нагружений поперечный откол происходил внутри исследуемого образца. Интересно было понять, влияет ли поперечный откол в образце на характер разрушения поверхности. Для этого были проведены опыты с алюминиевым ударником толщиной 3–4 мм, заведомо большей толщины образца, разогнанным легкогазовой пушкой до скоростей 0.7 км/с. Длительность нагружения около 1 мкс. Давления в образце, нагружаемом толстым ударником, меньше, чем в предыдущих опытах.

На рис. 8*a* показана фотография постопытного образца с углом 90° при вершине пирамиды после нагружения алюминиевым ударником толщиной 3 мм при скорости ударника 0.73 км/с. (Ребристость на гранях пирамидок возникла при торможении об-

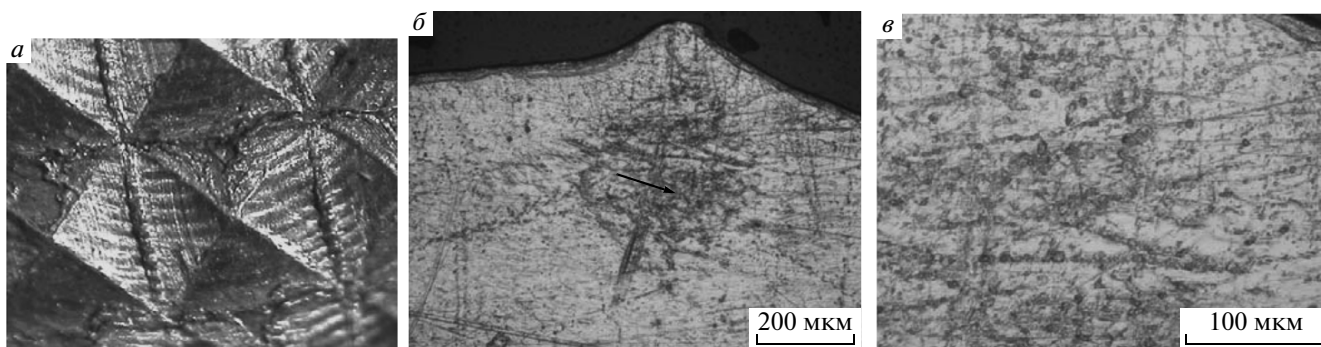


Рис. 8. Фотографии поверхности (а) постопытного образца и срезов (б, в) образца из алюминия с углом 90° при вершине пирамиды после нагружения алюминиевым ударником толщиной 3 мм (скорость ударника 730 м/с, $P = 5.8$ ГПа). Стрелка указывает на полости внутри пирамиды

разца на пластине полиэтилена с поверхностью после грубой механической обработки.)

На рис. 8а нет признаков продольного разрушения, а только следы кумулятивных струй. Одна из возможных причин отсутствия разрушений в вершинах пирамид — малая амплитуда давления в ударной волне. На срезе образца обнаружено множество мелких полостей разрушения внутри пирамид (рис. 8б, в), по-видимому, вследствие зарождения разрушения при встрече боковых волн разгрузки в пирамиде.

Подобные картины наблюдали и на образцах меди при различной длительности нагружений, но с более выраженными следами кумулятивных струй.

3.5. Следы кумулятивных струй

В тех случаях, когда продольное разрушение в клине затруднено (низкое давление нагружения, $\beta < 90^\circ$), разрушение свободной поверхности происходит в основном в виде кумулятивных струй (рис. 9). Следы кумулятивных струй различны по форме. Например, в образцах меди, в которых глубины a перпендикулярных полос углублений различны (0.77 и 0.72 мм), но значение периода между полосами ($\lambda = 1.43$ мм) и величины двугранного угла углублений ($\beta \approx 60^\circ$) сохранены (искаженная форма пирамиды с вершиной в виде отрезка, одномерный гребень). В более глубоких углублениях сохраняется «кумулятивный материал» при формировании кумулятивных струй, в более мелких — только трещины от кумулятивных струй. Еще более выражены различия следов на поверхности подобных образцов после нагружения толстым ударником (рис. 9б).

Сравнение численных и экспериментальных форм разрушений в результате кумулятивных струй (рис. 9б) также может быть тестом для разрабатываемых численных моделей разрушения.

Также для количественного определения выброса металла были проведены измерения массы образцов до и после опытов. В тех случаях, когда зарегистрированы разрушения в результате только кумулятивных струй, масса сохраненных образцов из алюминия в пределах погрешности измерений ± 0.002 г не изменилась. В дальнейшем при регистрации подобных трещин от кумулятивных струй считали, что масса металла на единицу площади, вылетевшего в кумулятивных струях, составляет около 0.002 г/см². В тех случаях, когда наблюдались продольные разрушения в пирамидах и сохранялись размеры образца, потеря массы составляла около 0.04 г/см², что на порядок больше выброса от кумулятивных струй.

Для определения спектра размеров частиц материала, выброшенного из образца, использовался метод «мягких мишеней» для улавливания выброшенных частиц пластиной полиэтилена, расположенной на расстоянии 1 мм от поверхности образца, на которую нанесены углубления. При этом вопрос влияния плотности и прочности материала мишени на вторичное дробление улавливаемых частиц пока не изучался.

В одном из опытов (медный образец толщиной $H = 1.45$ мм, $a = 0.77$ мм, $\lambda = 1.43$ мм, $\beta \approx 60^\circ$, $d = 0.11$ мм, $w = 6.7$ км/с) на срезе полиэтилена с помощью оптического микроскопа удалось выделить 864 отдельные медные частицы. На рис. 10 приведена гистограмма распределения размеров медных частиц, определенных по среднему диаметру

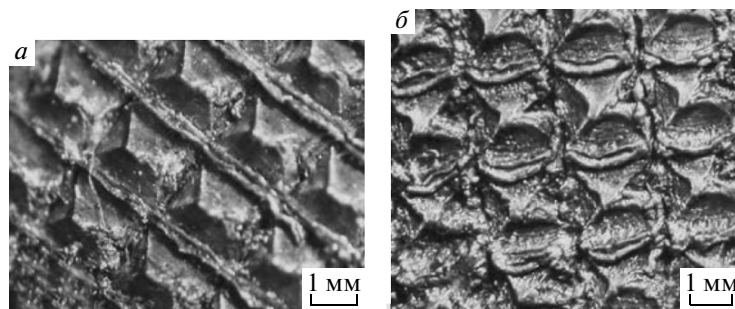


Рис. 9. Фотография поверхности постопытного медного образца: *a* — после нагружения ударником из оргстекла толщиной 1 мм ($w \approx 1$ км/с); *б* — после нагружения медным ударником толщиной 3 мм ($w = 0.54$ км/с)

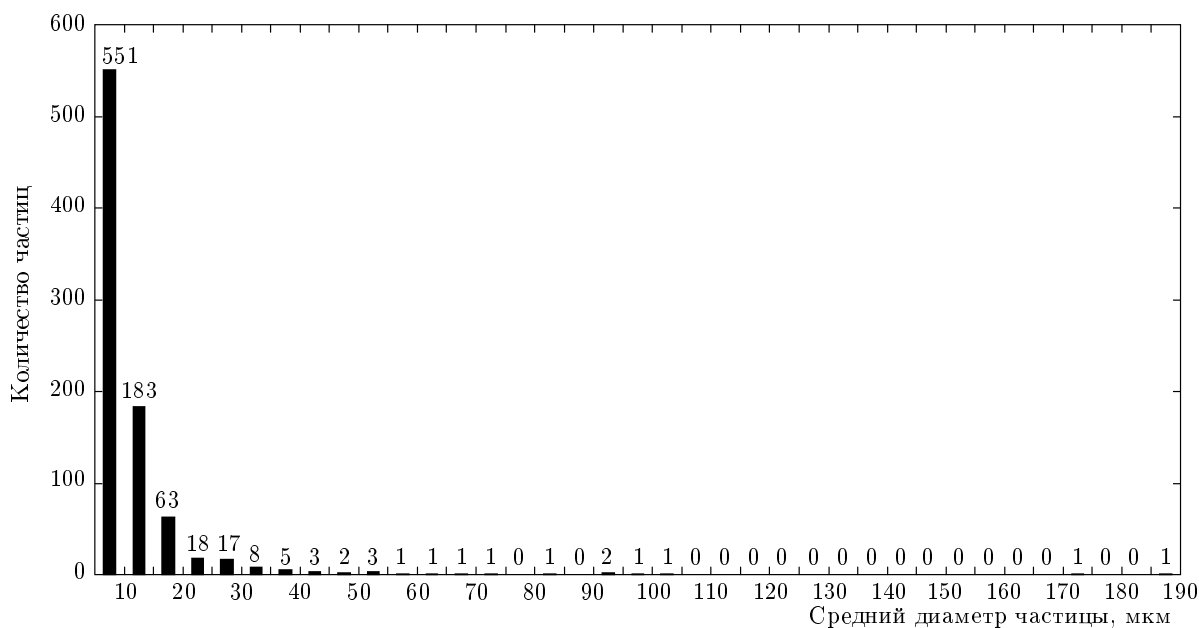


Рис. 10. Гистограмма распределения количества частиц по их характерному размеру

частицы. Характерный размер (средний диаметр частицы) вылетевших частиц варьировался от 1 до 189 мкм. Максимальная глубина проникновения медных частиц в пластину полиэтилена 950 мкм.

Измеряя глубину проникания и размер частиц в «мягких мишенях» различной плотности и используя расчеты проникания частицы в плотные среды, можно оценить скорости вылетевших частиц. Для этого можно использовать и непосредственно дублирующую скоростную микрофотосъемку вылета частиц [6]. Совмещение этих двух методов повысит достоверность результатов и позволит учесть дополнительное дробление частиц при их торможении на материале улавливателя (мягкой мишени).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в области давлений $P = 10-20$ ГПа ниже области плавления металла при длительности импульсов 0.02 и 0.2 мкс, когда размеры искусственной шероховатости сравнимы с шириной откольного слоя, главный вклад в разрушение свободной поверхности вносят продольные разрушения в гребнях или пирамидах и поперечные отколы (при $\beta \geq 90^\circ$), а формирование кумулятивных струй прекращается. Характер и степень разрушения зависят от параметров углублений, нанесенных на свободную поверхность.

В случае, когда разрушение в клине происходит по всей высоте клина одновременно ($\beta \approx 90^\circ$), выброс частиц в результате взаимодействия сил рас-

тяжения (продольное разрушение, около 0.04 г/см^2) на порядок превосходит выброс материала от кумулятивных струй (менее 0.002 г/см^2).

Количественное моделирование рассмотренных процессов разрушения приповерхностного шероховатого слоя металла при выходе на свободную поверхность ударной волны может быть сделано на основе современных компьютерных кодов при условии наличия в них базовых данных по реальным динамическим упруго-пластическим и прочностным свойствам материалов. В случае реальных шероховатостей свободной поверхности ($\lambda = 10\text{--}50 \text{ мкм}$), сравнимых обычно с характерным размером зерна поликристаллических материалов, необходимо учитывать и этот параметр гетерогенности, пока недоступный распространенным компьютерным кодам численного моделирования на языке механики сплошных сред и не рассматривавшийся в наших экспериментах. Необходимо, как уже отмечалось выше, учитывать и гетерогенный характер деформирования материалов на мезоуровне.

При повышении амплитуды давления ударной волны в образце и ее длительности и, тем более, при приближении к давлениям ударно-волнового плавления вследствие теплового сдвигового разрушения металла большую роль в эжекции материала со свободной поверхности, по-видимому, начнут играть гидродинамические неустойчивости Рихтмайера – Мешкова и Рэлея – Тейлора [7].

Авторы выражают благодарность А. Я. Учаеву за инициирование исследований процессов разрушений свободной поверхности при коротких временах нагружения и за предоставленные образцы.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Козырев, *Газодинамический термоядерный синтез*, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров (2005).
2. В. А. Огородников, А. Г. Иванов, А. Л. Михайлов и др., *Физика горения и взрыва* **34**(6), 103 (1998).
3. А. Я. Учаев, Н. И. Сельченкова, Е. В. Кошелева и др., в сб. *Материалы XII междунар. конф. «Забабахинские научные чтения»* (2014), с. 230.
4. Е. И. Забабахин, *Некоторые вопросы газодинамики взрыва*, Снежинск (1997), с. 141.
5. В. В. Мохова, Л. А. Егоров, И. Н. Говорунов и др., *ПТЭ* № 6, 94 (2010).
6. Н. В. Невмержицкий, А. Л. Михайлов, В. А. Раевский и др., в сб. *Материалы XIII междунар. конф. «Харитоновские чтения»* (2011), с. 604.
7. В. В. Игонин, Г. Б. Красовский, С. Е. Куратов и др., в сб. *Материалы XI междунар. конф. «Харитоновские чтения»* (2009), с. 605.