

УДК 539.4

DOI: 10.53403/9785951504944\_2020\_25.2\_76\_87

# Разрушение ударно-сжатых металлических образцов с искусственными возмущениями на свободной поверхности

**В. В. Мохова<sup>1,2</sup>, А. Л. Михайлов<sup>1</sup>,  
А. В. Тилькунов<sup>1,2</sup>, Н. И. Орлов<sup>2</sup>,  
Л. И. Канунова<sup>1</sup>, В. А. Брагунец<sup>1</sup>,  
М. И. Ткаченко<sup>1</sup>, В. Г. Симаков<sup>1</sup>**

*Приведены результаты исследования разрушения свободной поверхности образцов алюминия и меди при нагружении ударной волной умеренной интенсивности с длительностью импульса давления 0,02 мкс, 0,2 мкс, 1 мкс. На свободной поверхности образцов были нанесены искусственные углубления, имитировавшие в 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 от 5 до 53 ГПа (ниже области плавления). Анализ свободной поверхности постопытных образцов показал, что при определенных условиях нагружения степень разрушения свободной поверхности и выброс металла отличаются на порядки в зависимости от шероховатости поверхности.*

*Для определения количественных показателей выброса металла и распределения по размерам частиц использовался метод мягких улавливающих мишеней.*

Для обоснования и обеспечения работоспособности различных конструкций, например мишеней инерциального термоядерного синтеза [1], важно понимание природы процессов разрушения (потери устойчивости и последующего выброса металла) на свободной границе образцов, точнее, на границе *металл – воздух* при выходе на нее ударной волны.

Цель работы – исследование механизмов разрушения свободной поверхности образцов из алюминия и меди при выходе ударной волны умеренной интенсивности из образца. Эти механизмы связаны с шероховатостью поверхности, которую в упрощенном виде можно представить в виде углублений и выступающих клиньев (гребней) или пирамид. Ширина откольного слоя сравнима с глубиной шероховатости поверхности (0,7–0,9 мм) и зависит от толщины диэлектрического ударника (0,1–1 мм).

---

© Journal of Dynamic Behavior of Materials. 2017. Vol. 3, Issue 2. P. 164–173 [DOI: 10.1007/s40870-017-0109-3].

<sup>1</sup> ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

<sup>2</sup> СарФТИ НИЯУ «МИФИ», г. Саров Нижегородской обл.

## **Феноменология**

В процессе разрушения свободной поверхности с шероховатостью существенную роль должны играть кумулятивные струи и откольные явления в образце вследствие растягивающих напряжений в волнах разгрузки. В нашем случае откольные разрушения возникают при взаимодействии волн разгрузки со свободных поверхностей образца и ударника (поперечный откол) и при встрече боковых волн разгрузки в клине (гребне или пирамиде) – продольная трещина [2].

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 акустическом 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 откольную прочность, происходит разрушение материала.

На рис. 1 показаны схемы распространения волн разрежения и форма разрушения клина при выходе ударной волны на выпуклый двугранный угол при различных значениях угла  $\beta$  [2]. В волнах разгрузки, распространяющихся со свободной поверхности клина (граней клина – естественной шероховатости при механической обработке), проекции массовой скорости внутри клина в продольном (параллельном высоте клина) и поперечном (перпендикулярном высоте клина) направлениях зависят от двугранного угла клина  $\beta$ . Следовательно, степень, скорость, положение зарождения разрушения (продольной трещины в клине) и выброс металла зависят от угла  $\beta$  у вершины клина. При  $\beta < 90^\circ$  волны разрежения встречаются ниже плоскости основания пирамид. Разрушение металла (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 вглубь клина [2]. При  $\beta = 90^\circ$  в акустическом приближении волны разрежения встречаются по всей высоте пирамиды в момент выхода ударной волны на вершину угла. Разрушение металла формально начинается одновременно по всей плоскости симметрии на линии биссектрисы двугранного угла.

При взаимодействии сил растяжения, вызывающих продольный и поперечный отколы, разрушения внутри клина или пирамиды и выброс материала могут быть значительны. На рис. 2 схематично показаны виды разрушения (или механизмы потери устойчивости исходной формы (профиля) свободной поверхности) – поперечный и продольный отколы и кумулятивные струи, образующиеся при схлопывании боковых граней гребней (пирамид).

В работе не рассматривается влияние микроструктуры материала и гетерогенности течения при его деформировании, вносящих свой вклад в ударно-волновое пыление свободной поверхности.

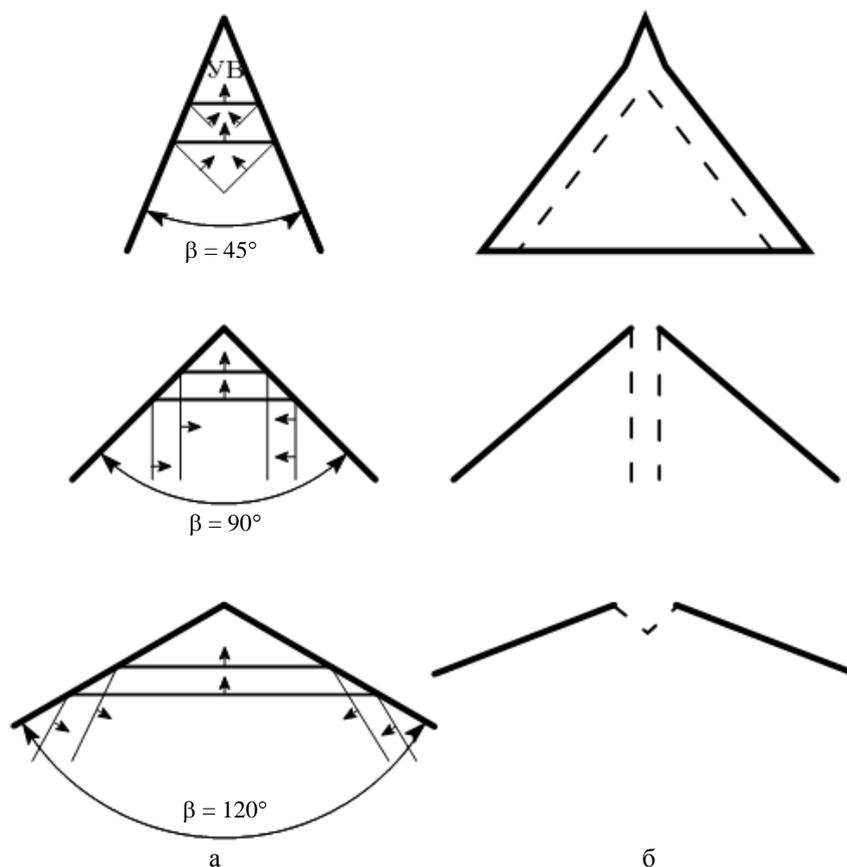


Рис. 1. Схема прохождения ударной волны по клину (а), форма свободной поверхности и область разрушения клина при различных углах клина (б). Толстые линии – фронт ударной волны, тонкие линии – фронт волны разгрузки, стрелки – направление распространения, пунктирные линии – форма разрушения в клине



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

## Образцы

Для имитации в увеличенном масштабе естественной шероховатости поверхности после механической обработки использовались образцы из алюминия марки 04 (99,99 % Al) и АМг, а также меди марки М1 в виде дисков или пластин толщиной  $H = 1,35-2$  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) различной глубины  $a = 0,7-0,97$  мм и периодами  $\lambda = 0,8-3,5$  мм между углублениями. Двугранный угол  $\beta$  у вершины гребня или пирамиды, образованный противоположными гранями пирамиды или гребня, изменялся от  $45^\circ$  до  $136^\circ$ .

На рис. 3 показаны фотографии исходной поверхности алюминиевых образцов.

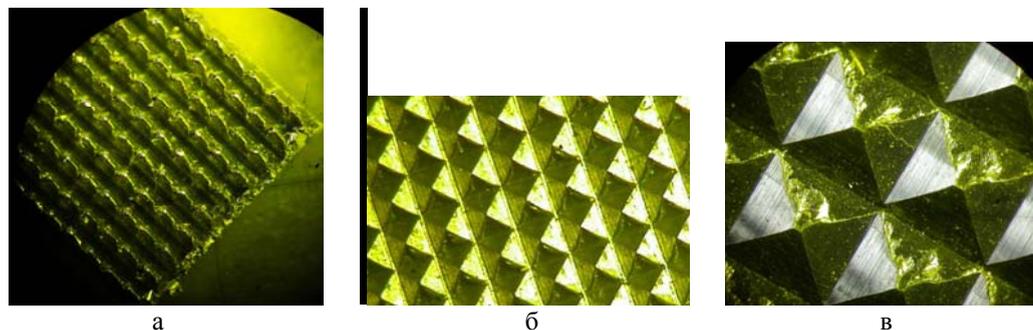


Рис. 3. Фотографии поверхности исходных образцов: а –  $\beta = 45^\circ$  ( $a = 0,97$  мм,  $\lambda = 0,8$  мм,  $H = 1,55$  мм); б –  $\beta = 90^\circ$  ( $a = 0,71$  мм,  $\lambda = 1,43$  мм,  $H = 1,35$  мм); в –  $\beta = 136^\circ$  ( $a = 0,7$  мм,  $\lambda = 3,5$  мм,  $H = 2$  мм)

## Постановка экспериментов

Для экспериментального исследования процессов разрушения при высоких скоростях деформирования применялась электровзрывная установка (электропушка) [3], разгоняющая энергией электровзрыва алюминиевой фольги тонкие диэлектрические ударники до скорости  $w_{уд} \approx 8$  км/с. Использование диэлектрических ударников различной толщины, разогнанных электровзрывной установкой, позволило варьировать скорость полета ударника. Например, при толщине ударника из оргстекла  $d_{уд} = 1$  мм скорость полета ударника  $w_{уд} \approx 2,7$  км/с, а при толщине ударника из лавсана  $d_{уд} = 110$  мкм  $w_{уд} \approx 6,7$  км/с с соответствующим изменением длительности импульса нагружения ступенчатой формы. Площадь ударника  $32 \times 80$  мм<sup>2</sup>. Скорость и симметрию полета ударника на электропушке контролировали с помощью фотохронографа [3], погрешность измерения скорости – 5 %.

В отличие от систем на основе взрывчатых веществ применение электровзрывной пушки позволяет избежать фугасного воздействия, разрушающего исследуемый образец и делающего его малопригодным для дальнейшего постопытного анализа.

Выводы делались на основании анализа микро- и макрофотографий свободной поверхности образцов, сохраненных после ударно-волнового нагружения.

Для определения количественного выброса металла при разрушении свободной поверхности использовался метод *мягких мишеней*, заключающийся в улавливании выброшенных частиц пластиной полиэтилена, расположенной на расстоянии 1 мм от поверхности образца с нанесенными углублениями. Схема эксперимента показана на рис. 4.

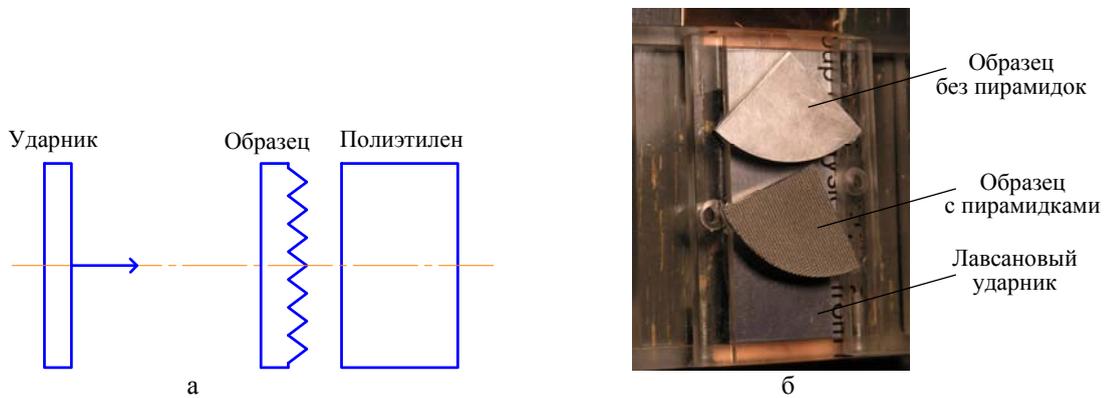


Рис. 4. Схема эксперимента (стрелкой указано направление полета ударника) (а) и фотография блока метания с алюминиевыми образцами без полиэтилена (б): вверху – образец без искусственной шероховатости, внизу – с гребнями,  $\beta = 45^\circ$

При соударении ударников толщиной 0,11 и 1 мм с образцами длительность постоянного течения при подходе ударной волны к границе образца равнялась соответственно  $\sim 0,02$  и  $\sim 0,2$  мкс. Нагружение короткой длительности (0,02 мкс) реализовали при торможении ударника из лавсана толщиной  $d_{уд} = 110$  мкм, разогнанного энергией электровзрыва алюминиевой фольги до  $w_{уд} = 6,7$  км/с, на образце, на свободной поверхности которого нанесены искусственные углубления. Соответствующий импульс давления имел треугольную форму с убывающей по мере распространения волны амплитудой вследствие действия догоняющей волны разгрузки.

Нагружение образцов условно столообразным импульсом давления длительностью 0,2 мкс реализовали с помощью ударника из оргстекла толщиной  $1 \pm 0,1$  мм, разогнанного до 2,5–2,75 км/с.

В некоторых опытах размеры образца превышали ширину ударника, а тем более ширину плоской части соударения ударника и образца (скорость периферии (краев) ударника ниже скорости его центральной плоской части [3]). Фотоснимки свободной поверхности образца, которая либо не подвергалась ударно-волновому воздействию, либо оказалась в зоне более низких давлений, позволили наблюдать развитие разрушения по мере увеличения давления.

## Результаты и обсуждение

**Разрушение поверхности образцов при нагружении треугольным импульсом давления длительностью 0,02 мкс.** На рис. 5 показаны снимки свободной поверхности постопытных алюминиевых образцов с различными исходными углами у вершин гребней или пирамид после соударения с тонким лавсановым ударником толщиной 0,11 мм.

На рис. 5,а показана свободная поверхность постопытного образца из алюминия 04 с углом при вершине гребня  $\beta \approx 45^\circ$  ( $a = 0,97$  мм,  $\lambda = 0,8$  мм,  $H = 1,55$  мм). Видно, что разрушения свободной поверхности незначительны. Выталкивание металла начинается в углублениях (обнаружены тонкие трещины – следы кумулятивных струй) и сопровождается одновременным «распуханием» гребней за счет тонкого поперечного откола ( $\sim 0,1$  мм) на гранях гребней; вершины гребней не разрушены.

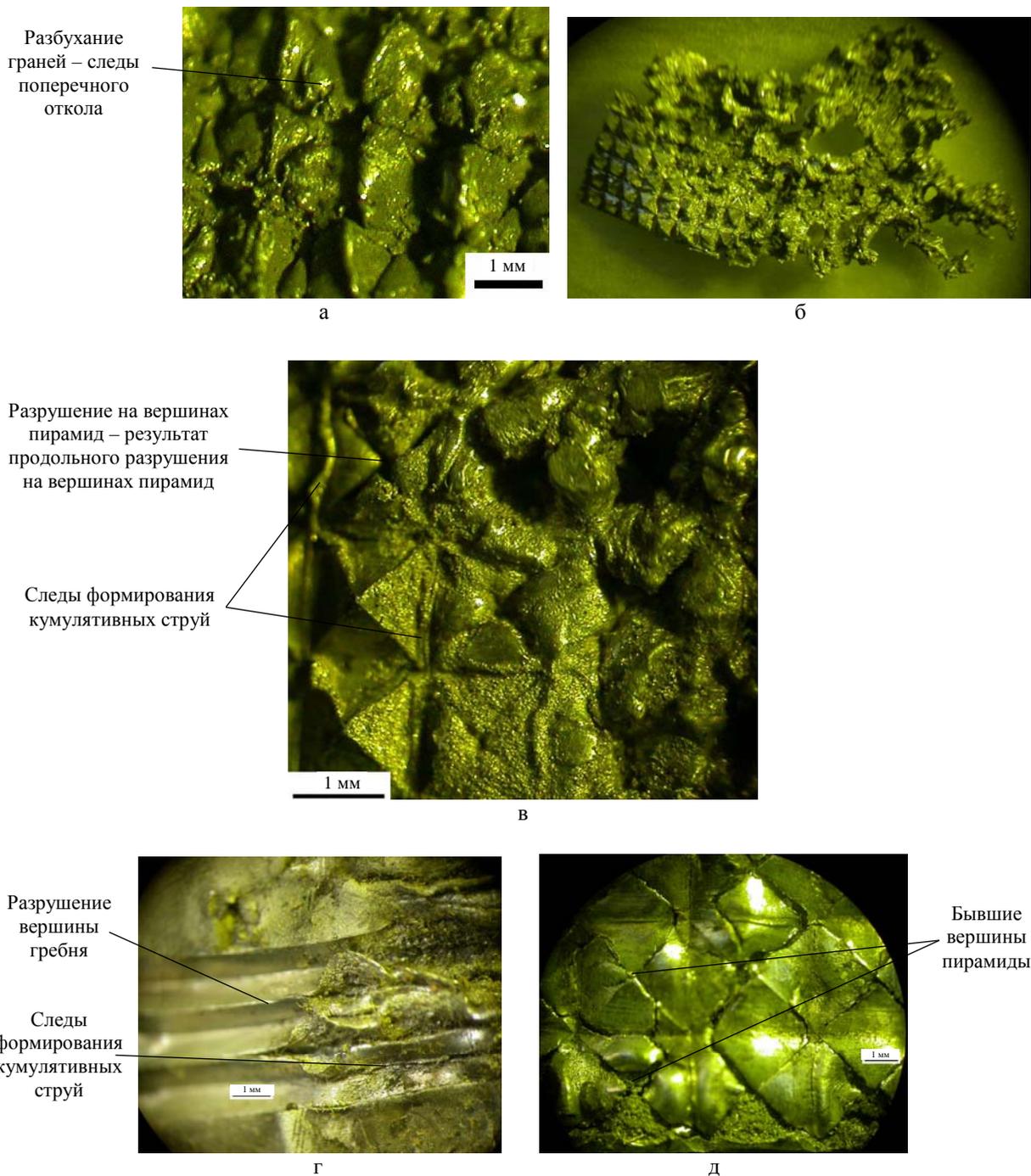


Рис. 5. Фотографии свободной поверхности постопытных образцов алюминия после соударения с ударником толщиной 0,11 мм ( $w_{уд} = 6,7$  км/с). Исходные углы у вершин гребней: а –  $\beta \approx 45^\circ$ ; б–г –  $\beta \approx 90^\circ$ ; д –  $\beta \approx 136^\circ$

При тех же условиях нагружения на свободной поверхности образцов с углом при вершине пирамиды  $\beta \approx 90^\circ$  ( $a = 0,71$  мм,  $\lambda = 1,43$  мм,  $H = 1,35$  мм) разрушения значительны, вплоть до сквозного разрушения образца толщиной 1,35 мм (см. рис. 5,б).

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 (см. рис. 5,в). Здесь разрушение начинается на ребрах и вершинах пирамид и происходит «выпучивание» металла из углублений (образуется шип). В тех случаях, когда по тем или иным причинам откол не наблюдается, заметны следы формирования кумулятивных струй в углублениях [3].

На снимке периферии пестопытного образца с углом при вершине гребня  $\beta \approx 90^\circ$  ( $a = 0,7$  мм,  $\lambda = 1,4$  мм,  $H = 2$  мм) (рис. 5,з) видно, что разрушение начинается на вершинах гребней как результат продольной трещины.

На свободной поверхности образцов с углом при вершине пирамиды  $\beta \approx 136^\circ$  ( $a = 0,7$  мм,  $\lambda = 3,5$  мм,  $H = 2$  мм) (рис. 5,д) разрушение также начинается на ребрах и вершинах пирамид (продольное разрушение), но, видимо, происходит недостаточно глубоко. Поэтому решающим моментом оказывается поперечный откол, при котором отлетает верхний слой образца, почти как в случае с образцом без искусственных возмущений.

***Разрушение поверхности образцов при нагружении столообразным импульсом давления длительностью 0,2 мкс.*** Определенный интерес представляет процесс взаимодействия волн разгрузки и разрушения 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.

Анализ разрушений свободной поверхности пестопытных образцов после нагружения импульсом давления длительностью 0,2 мкс показал, что характер разрушений примерно такой же, как и при короткой длительности 0,02 мкс.

В образцах с углом у вершины гребня  $\beta \approx 45^\circ$  ( $a = 0,97$  мм,  $\lambda = 0,8$  мм,  $H = 1,55$  мм) выброс металла происходит из углублений как за счет поперечного откола, так и за счет кумулятивных струй (тонкие трещины в гребнях). На вершинах гребней сохраняются неотколовшиеся слои металла (рис. 6,а).

В образцах с углом у вершины пирамиды  $\beta \approx 90^\circ$  ( $a = 0,7$  мм,  $\lambda = 1,4$  мм,  $H = 1,35$  мм) (рис. 6,б) на месте вершин пирамид образуются воронки (пузыри), а из углублений поднимается металл (шипы); отрыв не происходит.

В образцах с углом у вершины пирамиды  $\beta \approx 136^\circ$  ( $a = 0,7$  мм,  $\lambda = 3,5$  мм,  $H = 2$  мм) также наблюдается поперечный откол и продольное разрушение по оси и по ребрам пирамиды (рис. 6,в), а также подъем металла (шипы) из углублений, на котором видны «зародыши» кумулятивных струй. На месте вершин пирамид появились отверстия, по форме напоминающие усеченную пирамиду. На рис. 6,в показана только отлетевшая часть свободной поверхности образца.

Сравнение форм разрушений пирамид и гребней, полученных при численном моделировании, с экспериментально регистрируемыми формами (см. например, рис. 6,в), позволит тестировать разрабатываемые модели разрушения.

Взаимодействие нескольких (более двух) волн разгрузки при различных гидродинамических и прочностных свойствах материалов приводит к различным результатам разрушений. Например, на рис. 7 показаны фотографии двух пестопытных образцов меди и алюминия с одинаковыми параметрами шероховатости ( $a = 0,7$  мм,  $\lambda = 1,4$  мм,  $H = 2$  мм), деформированных в одном опыте после соударения с ударником из оргстекла толщиной 1 мм, разогнанным до скорости 2,5 км/с.

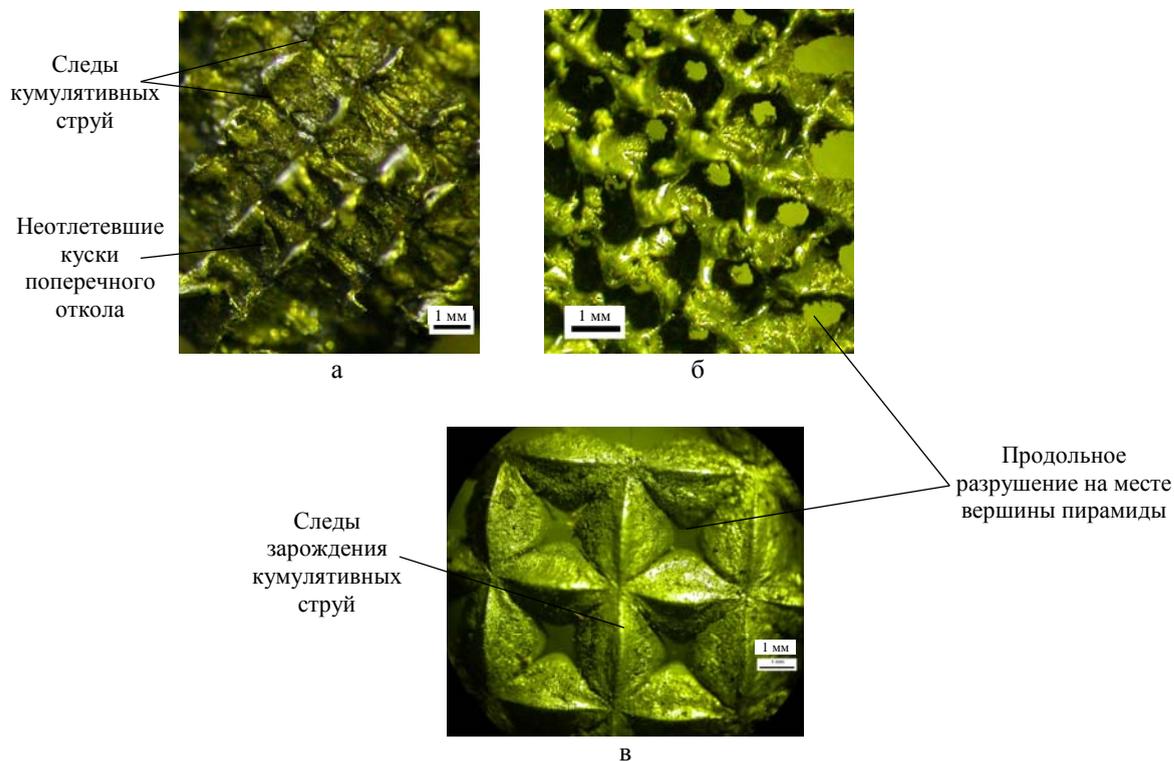


Рис. 6. Фотографии свободной поверхности постопытных образцов после нагружения ударником из оргстекла толщиной 1 мм: а –  $\beta \approx 45^\circ$ , б –  $\beta \approx 90^\circ$ , в –  $\beta \approx 136^\circ$

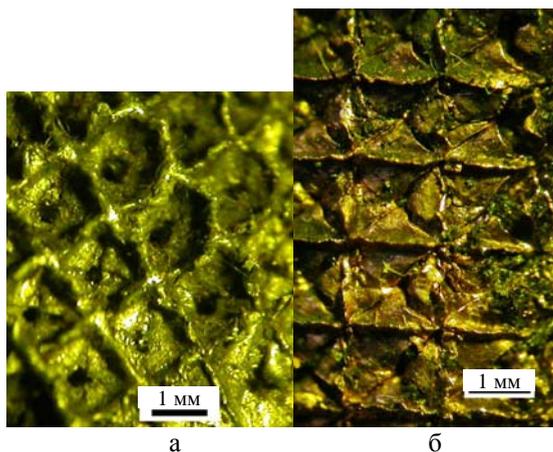


Рис. 7. Фотографии свободной поверхности образцов алюминия (а) и меди (б) с одинаковыми параметрами шероховатости после соударения с ударником из оргстекла толщиной 1 мм в одном опыте

В опытах с ударником толщиной 3–4 мм, заведомо большей толщины образца, разогнанным легкогазовой пушкой до скорости 0,7 км/с (длительность нагружения ~1 мкс), продольного разрушения не наблюдалось [4], видны только следы кумулятивных струй.

**Следы кумулятивных струй.** В тех случаях, когда продольный откол в клине затруднен, разрушение свободной поверхности происходит в основном в виде кумулятивных струй. Следы кумулятивных струй различны по форме, например в образцах меди после соударения с ударником из оргстекла толщиной 1 мм (рис. 8,а,б). В этих образцах глубина перпендикулярных полос углублений отличается ( $a = 0,77$  и  $0,72$  мм), но период  $\lambda = 1,43$  мм между полосами и двугранный угол  $\beta \approx 60^\circ$  углублений сохранены (искаженная форма пирамиды с вершиной в виде отрезка, одномерный гребень). На рис. 8,а скорость ударника не измерялась ( $w < 1$  км/с), самопробой напряжения на электропушке. На рис. 8,б скорость ударника из оргстекла 2,5 км/с.

В более крупных углублениях при формировании кумулятивных струй сохраняется «материал выпучивания», в более мелких – только трещины от кумулятивных струй. Еще более выражены отличия следов на поверхности подобных образцов после нагружения толстым ударником (рис. 8,в).

Сравнение численных и экспериментальных форм разрушений в результате кумулятивных струй также может быть тестом для разрабатываемых численных моделей разрушения.

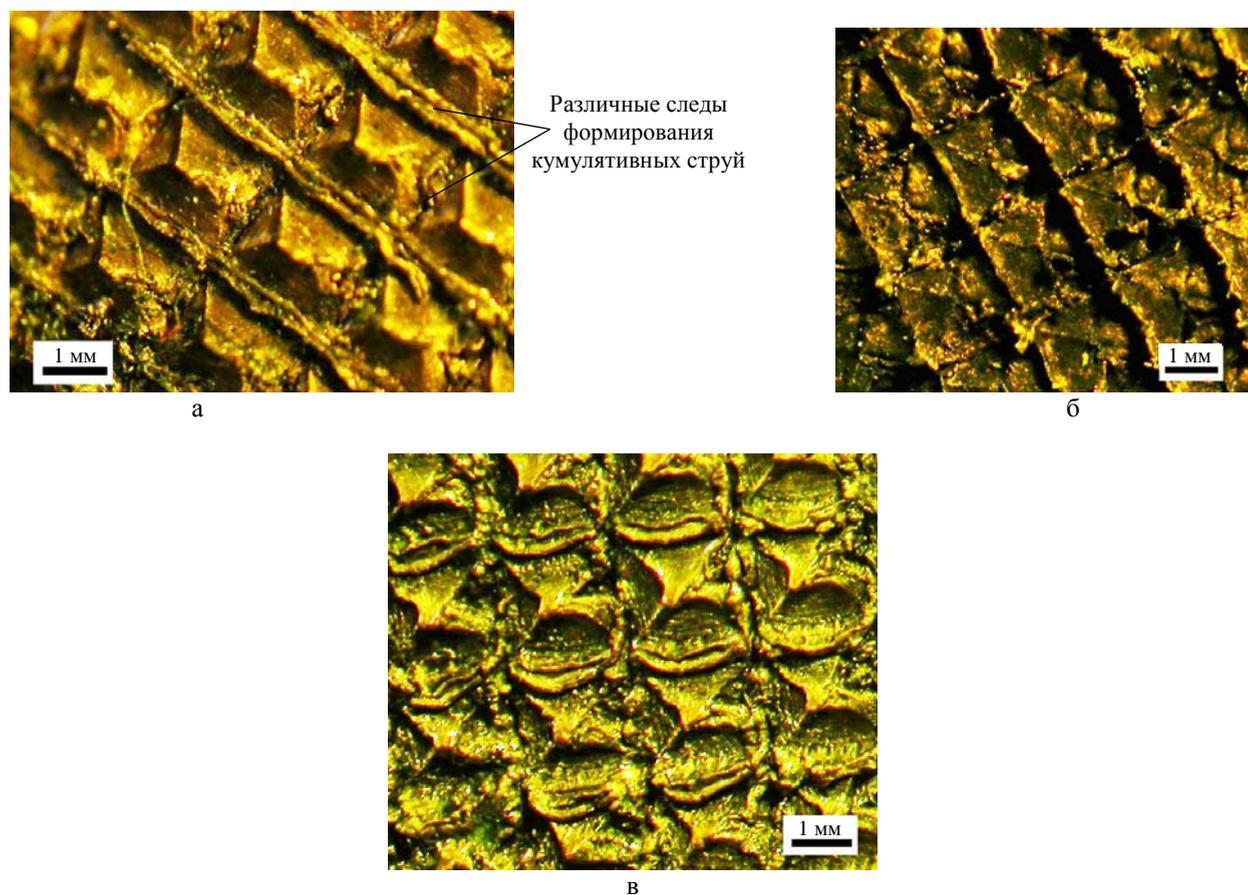


Рис. 8. Фотография поверхности постопытного медного образца после нагружения ударником из оргстекла толщиной 1 мм ( $w_{уд} < 1$  км/с (а),  $w_{уд} = 2,5$  км/с (б)) и медным ударником толщиной 3 мм ( $w_{уд} = 0,54$  км/с (в))

**Размеры выброшенных частиц.** Для определения спектра размеров частиц материала, выброшенных из образца, использовался метод мягких мишеней. (Вопрос влияния плотности и прочности материала мишени на вторичное дробление улавливаемых частиц пока не изучался.)

На рис. 9 показаны фотографии срезов пластин полиэтилена с выброшенными частицами из образцов алюминия и меди после соударения с ударником из лавсана толщиной 0,11 мкм, разогнанным до  $w_{уд} = 6,7$  км/с.



а



б

Рис. 9. Фотографии срезов пластин полиэтилена, улавливающих частицы из образцов: а – алюминиевого (гребни  $H = 2$  мм,  $a = 0,7$  мм,  $\lambda = 1,4$  мм,  $\beta \approx 90^\circ$ ); б – медного (пирамиды  $H = 1,45$  мм,  $a = 0,87$  мм,  $\lambda = 1,00$  мм,  $\beta \approx 60^\circ$ )

В одном из опытов (медный образец,  $H = 1,45$  мм,  $a = 0,8$  мм,  $\lambda = 1,00$  мм,  $\beta \approx 60^\circ$ ,  $d_{уд} = 0,11$  мм,  $w_{уд} = 6,7$  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 частицы. Характерный размер (средний диаметр) вылетевших частиц варьировался от 1 до 190 мкм. Максимальная глубина проникновения медных частиц в пластину полиэтилена 950 мкм. Плотность полиэтиленовой пластины  $\rho_0 = 0,93 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. В подобных экспериментах с алюминием присутствуют частицы большего диаметра (от 130 до 400 мкм, см. рис. 9,а), чем в экспериментах с медными образцами. Причина увеличенных размеров выброшенных частиц алюминия выясняется.

Измерив глубину проникания и размер частиц в мягких мишенях различной плотности и используя расчеты проникания частицы в плотные среды, можно оценить скорости вылетевших частиц, воспользовавшись непосредственно дублирующей скоростной микрофотосъемкой вылета частиц [5]. Совмещение двух методов повысит достоверность результатов и позволит учесть дополнительное дробление частиц при их торможении на материале улавливателя (мягкой мишени).

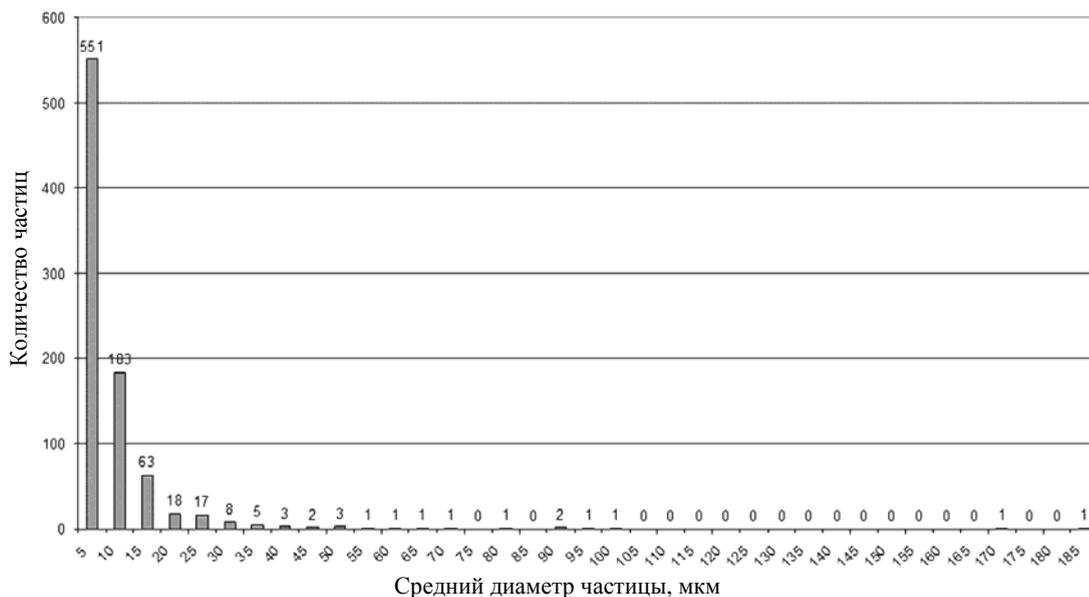


Рис. 10. Гистограмма распределения количества частиц по среднему диаметру частицы

### Заключение

В области давлений  $P = 10–53$  ГПа (ниже плавления металла) при длительности нагружающих 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 и поперечные отколы (при  $\beta \geq 90^\circ$ ). Характер и степень разрушения для одного и того же металла зависят от параметров шероховатости материала, динамической прочности и параметров нагружающего импульса.

Взаимодействие нескольких волн разгрузки при различных гидродинамических свойствах материалов приводит к различным результатам разрушений.

Количественное моделирование рассмотренных процессов разрушения приповерхностного шероховатого слоя металла при выходе на свободную поверхность ударной волны может быть проведено на основе современных компьютерных кодов при условии наличия в них базовых данных по реальным динамическим упругопластическим и прочностным свойствам материалов.

В случае реальных шероховатостей свободной поверхности ( $a, \lambda = 10–50$  мкм), сравнимых обычно с характерным размером зерна поликристаллических материалов, необходимо учитывать и параметр гетерогенности. Однако этот параметр, пока недоступный распространенным компьютерным кодам численного моделирования на языке механики сплошных сред, не рассматривался в наших экспериментах. Как отмечено выше, необходимо учитывать и гетерогенный характер деформирования материалов на мезоуровне.

При повышении амплитуды давления ударной волны в образце и ее длительности, а тем более при приближении к давлениям ударно-волнового плавления вследствие теплового сдвигового разупрочнения металла большую роль в выбросе материала со свободной поверхности, по-видимому, будут играть гидродинамические неустойчивости Рихтмайера – Мешкова и Рэлея – Тейлора [6].

## Благодарности

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

## Список литературы

1. Козырев А. С. Газодинамический термоядерный синтез. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005.
2. Забабахин Е. И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. – Снежинск: ВНИИТФ, 1997. С. 141.
3. Мохова В. В., Егоров Л. А., Говорунов И. Н. и др. Лабораторный рентгенодифракционный комплекс для исследования структурных изменений в материалах при ударном нагружении // ПТЭ. 2010. № 6. С. 94–99.
4. Мохова В. В., Михайлов А. Л., Тилькунов А. В. и др. Механизмы разрушения свободной поверхности ударно-сжатых металлов // ЖЭТФ. 2015. Т. 142. Вып. 6. С. 1146–1154.
5. Невмержицкий Н. В., Михайлов А. Л., Раевский В. А. и др. Микроскопическая электронно-оптическая регистрация процесса выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженного свинца // Сб. докл. XIII Международ. конф. «Харитоновские тематические научные чтения». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. С. 604.
6. Ольхов О. В., Игонин В. В., Красовский Г. Б. и др. Особенности развития неустойчивости Рихтмайера – Мешкова в двух- и трехмерной геометрии начальных возмущений // Сб. докл. XI Международ. конф. «Харитоновские тематические научные чтения». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 605.

## Fracture of Shock Loaded Metal Samples with Artificial Protrusions on Free Surface

V. V. Mokhova, A. L. Mikhailov, A. V. Til'kunov, N. I. Orlov, L. I. Kanunova,  
V. A. Bragunets, M. I. Tkachenko, V. G. Simakov, S. S. Sokolov

*The free surface fracture of aluminum and copper have been studied under conditions of the escape of a moderate-intensity shockwave from a sample, the variable duration of pressure pulses was 0.02, 0.2 and 1  $\mu$ s. The free surface of samples contained 0.7–0.9 mm deep artificial wells and protrusions simulating (on a greater scale of M 10:1) the natural surface roughness retained upon mechanical processing. The pressure in a shockwave pulse at the base of a protrusion was controlled within  $P = 10\text{--}53$  GPa (i.e., below the melting region). Analysis of the free surface of post-loaded samples showed that, for certain loading degree of fracture of a free surface and metal ejection differs depending on parameters of a roughness of a surface. The amount of ejected metal and the size distribution of metal microparticles were quantitatively characterized using soft collecting targets.*