

8. Брюховецкий В.В., Пойда В.П., Пойда А.В., Аврамец Д.Р. и др. Механические свойства и структурные изменения в ходе сверхпластической деформации алюминиевого сплава 6111. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2009 – Т.31, №9. – С.1289-1302.

9. Салтыков С.А., *Стереометрическая металлография*. – М., *Металлургия*, 1975. – 150 с.

10. Study on the Microstructure and Texture of 3003 Aluminum Sheets Rolled by Laser-Textured Roll. / Chunbo Cai, Zesheng Ji, Huajun Zhang, Guojun Wang. // *Journal of Metallurgy*, Hindawi Publishing Corporation. – Volume 2009. P.1-6.

11. Mark L., Neil W. Selection of Descriptors for Particle Shape Characterization. *Particle & Particle Systems Characterization*. – February, 2003. - Volume 20, Issue 1, p. 25–38.

УДК 534.222.2

Канд. физ.-мат. наук Б.Г. Жуков,
научн. сотр. Р.О. Куракин,
канд. физ.-мат. наук С.И. Розов,
канд. физ.-мат. наук Б.И. Резников,
д-р физ. – мат. наук С.В. Бобашев,
канд. физ.-мат. наук С.А. Поняев
(ФТИ им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СОУДАРЕНИЙ ЧАСТИЦ С ПРЕГРАДАМИ

Розглядається постановка експериментів по дослідженню процесів високошвидкісних (до 6 км/с) співударянь пластикових ударників мм-розміру з багатошаровими алюмінієвими мішенями. Отримано данні про картину розльоту продуктів руйнування мішеней. Показано, що у разі тонких (перший шар) екранів в таких співударяннях не відбувається повного випаровування пластикового ударника.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HIGH-SPEED SO-STRESS OF PARTICLES WITH BARRIERS

In this work an experiment on investigation of the process of high-speed (up to 6 km/s) impact of mm-size projectiles on multilayer aluminum plates are presented. A new data on plate break-down and process of debris cloud formation are presented. It is shown that in the case of thin (first layer) plates in such an impact a full evaporation of projectile does not occur.

Защита космических аппаратов (КА) от ударов частиц космического мусора мм-размера весьма актуальна ввиду их многочисленности [1]. Эти частицы, как правило, имеют неправильную форму. Поэтому последствия их удара во многом должны отличаться от сферического удара. Это мотивировало постановку данной работы. Ее цель – выяснить особенности пробоя тонких пластин (элементов многослойной защиты КА – «защиты Уипла») ударниками кубической формы при различной ориентации вектора скорости и граней ударника относительно поверхности экрана.

Для разгона ударников до высоких скоростей использовался созданный в ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН [2] «компактный» рельсотрон с плазменным поршнем, способный в воздухе при атмосферном давлении разгонять до высоких скоростей 5-6 км/с пластиковые кубики мм-размера. Этот ускоритель представляет собой удобный и простой инструмент для экспериментальных исследований широкого круга задач динамики гиперскоростного полета тел и их взаимодействия с преградами. Постановка экспериментов с гиперскоростными телами

малых размеров обладает рядом преимуществ, в частности, минимальными затратами на проведение опытов, так как не требует создания дорогостоящих протяженных баллистических трасс. Типичная теневая фотография полета ударника (кубик из поликарбоната со стороной 2 мм) в атмосферном воздухе приведена на рис. 1.



Рис. 1 - Теневая фотография полета ударника (2-мм кубик из поликарбоната) в атмосферном воздухе. Скорость - 5,7 км/с. Сторона масштабной сетки 10 мм. Время экспозиции 20 нс.

Опыты проводились при нормальных и косых ударах кубика по мишени. На рис. 2 изображена составная мишень, расположенная под углом θ к траектории.

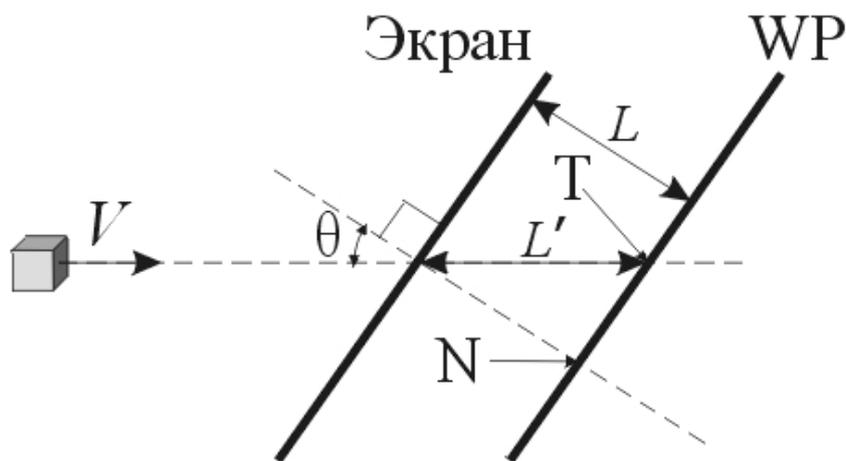


Рис. 2 – Схема составной двухслойной мишени.

Обозначения: L' - расстояние между мишенями по линии полета ударника; L - расстояние между мишенями по нормали; V - скорость пули перед ударом; θ - угол между вектором скорости и нормалью к поверхности мишени. Эксперименты проводились для следующих значений $\theta = 0^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ$. При нормальном ударе пули о мишень ($\theta = 0^\circ$) $L' = L = 50$ мм. В эксперименте с $\theta = 30^\circ$ $L' = 58$ мм ($L = 50$ мм). В экспериментах с $\theta = 45^\circ$ и $\theta = 60^\circ$ $L' = 50$ мм. Толщина

первой мишени (экрана), по которой ударял кубик, в большинстве экспериментов составляла величину 0,5 мм. Ряд экспериментов был поставлен с экранами толщиной 1,0 мм. На вторую пластину (WP) воздействовала высокоскоростная струя - факел, образуемая из осколков материала мишени и материала ударника после его соударения с экраном. Мишени были изготовлены из алюминия.

Схема установки и диагностических методик представлена на рис.3. Диагностические средства, используемые в эксперименте, включают в себя: 1) измерение скорости полета ударника перед столкновением с мишенью при помощи контактных пленочных датчиков [3]; 2) регистрацию ориентации ударника в полете; 3) регистрацию процесса разлета продуктов соударения ударника с мишенью. Ввиду того что ударник в наших экспериментах имеет кубическую форму, можно было ожидать что картина его взаимодействия с мишенью будет зависеть от его ориентации на момент соударения. Чтобы учесть этот фактор, ударник фотографировался на подлете к мишени в двух проекциях. Съемка проводилась обычными бытовыми фотокамерами, затворы которых открывались непосредственно перед выстрелом и оставались открытыми на протяжении всего эксперимента. Экспозиция обеспечивалась однократной импульсной подсветкой двух белых рассеивающих фоновых экранов, расположенных вблизи траектории.

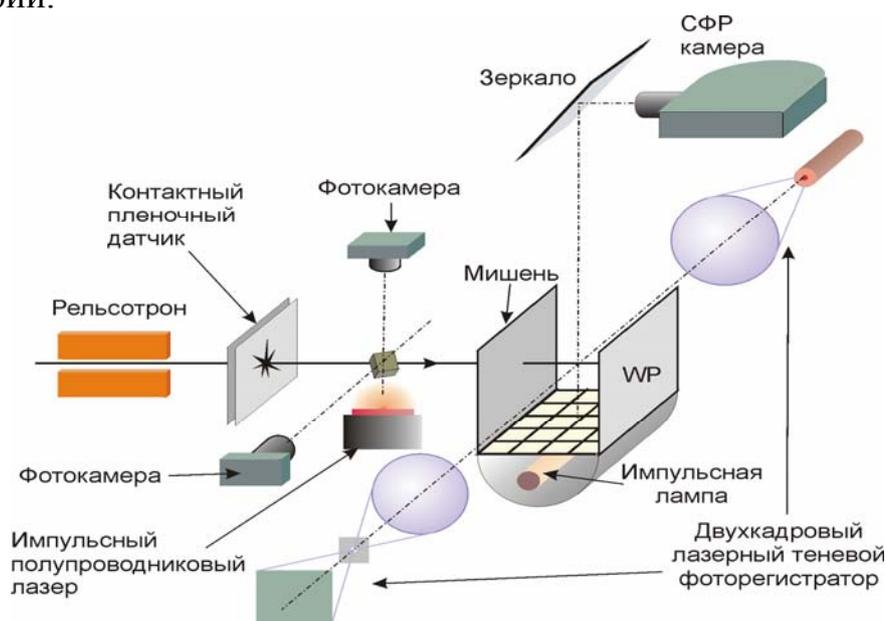


Рис. 3 – Схема постановки эксперимента.

В качестве источника света использовался полупроводниковый лазер с электронной накачкой (ПЛЭН) с длительностью светового импульса 10 нс. Синхронизация обеспечивалась запуском лазера от сигнала первого пленочного датчика. Для защиты от посторонних засветок (канал рельсотрона и импульсные лампы) объективы фотокамер были снабжены светофильтрами с полосой пропускания близкой к спектральной характеристике излучения полупроводникового лазера. Для защиты от засветки, вызванной возгоранием в воздухе разогретых мелкодисперсных частиц алюминия, выбрасываемых из мишени в момент удара навстречу движению пули, вся установка помещалась в

герметизирующую камеру, заполняемую перед экспериментом гелием при атмосферном давлении. Измерение высоких скоростей ($V > 1 - 2$ км/с) тел мм-размера представляет весьма сложную задачу. Для этих целей были разработаны [3] оригинальные тонкопленочные датчики, которые, как показали специальные эксперименты, практически не влияют на скорость и состояние быстролетящих ($V \sim 5$ км/с) пластиковых тел мм-размера. Измерение скорости ударника производилось парой контактных датчиков расположенных на траектории. Первый датчик располагается в 140 мм от выхода из канала рельсотрона. На траектории перед первым датчиком устанавливаются через равные интервалы четыре диафрагмы с апертурами диаметром 6 мм. Второй датчик располагается вблизи мишени или непосредственно на ней.

Регистрация картины разлета продуктов соударения в области между экраном и WP производилась двумя различными методами. Многокадровая фотосъемка процесса осуществлялась с помощью СФР-камеры. Эта камера позволяет получить ряд из 240 непрерывно следующих друг за другом кадров. Экспозиция каждого кадра, в использованном режиме фотосъемки, составляет 1 мкс. Полное время регистрации составляет таким образом 240 мкс, что дает возможность довольно подробно отследить весь процесс эволюции облака продуктов соударения. Объект регистрируется на фоне белого матового экрана, освещаемого импульсной лампой с длительностью вспышки ~ 300 мкс. В поле зрения помещена масштабная сетка с размером ячейки 10x10 мм. Фоновый экран размещается в окне в нижней стенке герметизирующей камеры. Изображение проецируется в объектив СФР-камеры с помощью плоского зеркала установленного над смотровым окном, расположенным в верхней стенке герметизирующей камеры. Двух-кадровая теневая фотосъемка производится оригинальной системой с использованием двух импульсных рубиновых лазеров в качестве источников подсветки и оптическим разделением световых потоков от них на разные фотопластины. Временной интервал между кадрами может задаваться произвольно. Длительность экспозиции каждого кадра определяется длительностью импульса лазера и составляет 20 нс. Система позволяет получить в каждом эксперименте две крупномасштабные, хорошо детализированные фотографии процесса с временным разрешением 20 нс. Съемка производится через два окна в противоположных боковых стенках герметизирующей камеры.

Лазерные теневые фото позволяют выявить более мелкие детали в разлетающемся облаке осколков, что, однако, не дает возможности в одном эксперименте зафиксировать все стадии. Кроме того, при постановке эксперимента в гелиевой атмосфере размеры используемой камеры не позволяют получать лазерные фотографии при соударениях кубика под углом к поверхности мишени. Поэтому, теневое фотографирование разлетающегося факела проводилось только в нескольких экспериментах, что позволило выявить ряд особенностей, в частности, наличие нитевидных структур в периферийных зонах факела. Разлетающееся облако осколков, даже при нормальном ударе ($\theta=0$), несимметрично, что, естественно, связано с наклоном в момент удара граней кубика к поверхно-

сти первой пластины. Соответственно, на второй пластине наблюдается неравномерное распределение микрократеров.

Типичная СФР-грамма развития пробоя алюминиевой пластины толщиной 0,5 мм, установленной под углом 45° к траектории ударника, 2-мм лексановым кубиком ($V=5,4$ км/с) дана на рис.4.

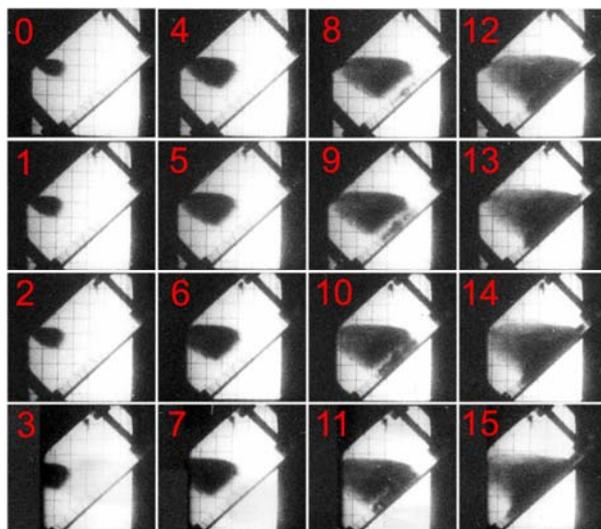


Рис. 4 - СФР-грамма пробоя. Время между кадрами 1 мкс, время экспозиции кадра 1 мкс, размер ячейки масштабной сетки 10мм×10мм.

Анализ СФР-грамм и эрозионных зон на WP позволил выявить некоторые особенности высокоскоростного пробоя экранов:

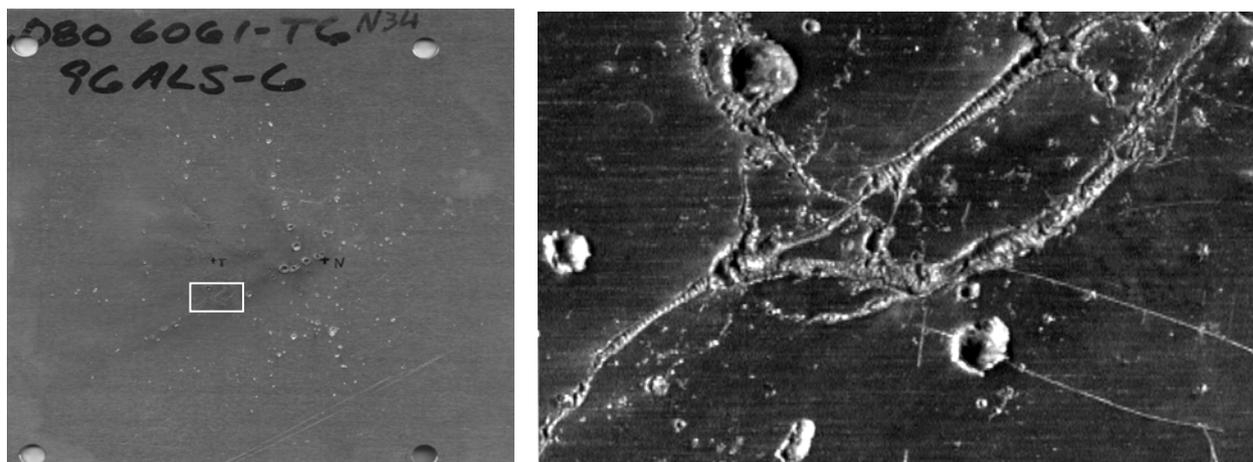
1. Скорость самых быстрых осколков (или головки факела) зависит от скорости соударения. При одинаковых мишенях и углах встречи с пулей увеличение скорости пули примерно на 10% приводит к заметному изменению времени достижения быстрыми осколками второй пластины.

2. Факел разлетающихся осколков при ударе под углом существенно неоднороден, причем та область, плотность осколков в которой больше, обязательно имеет наибольшую скорость. Направление полета основной части осколков близко к направлению, по которому летел кубик перед ударом. Однако, максимальную скорость имеют осколки, летящие в направлении, близком к нормали к поверхности пластины.

3. Чем большее значение имеет угол встречи θ кубика с мишенью, тем большая доля осколков разлетается в направлении, близком к нормали к поверхности. При одном и том же значении θ направление разлета основной массы осколков для скоростей удара, различающихся на 15-20%, примерно одно и то же.

4. Для пуль кубической формы при гиперскоростном ударе в эксперименте фиксируется неоднородное распределение кратеров от осколков разрушения первой пластины. Это проявляется, в основном, для тонких мишеней. Чем выше время взаимодействия (контакта) мишени с пулей до разгрузки, т.е. чем больше толщина пластины или меньше скорость удара, тем однородней распределение осколков.

Анализ зоны поражения WP-пластины составной мишени разлетом облака осколков выявил также особенности, которые, по-видимому, ранее в экспериментах по гиперскоростному пробое составных мишеней не наблюдались. Наряду с типичными кратерами, которые получаются при высокоскоростном соударении и вызваны мелкими частицами из материала первой пластины (алюминий), наблюдаются участки с зонами поражения нитеобразной формы (рис.5). Увеличенное изображение этих участков позволяет выявить тонкую структуру - на нитях имеются утолщения - зоны более глубокого поражения.



Т – точка пересечения WP начальной траекторией ударника; N - точка пересечения WP нормально к плоскости преграды, проведенной из точки соударения.

Рис.5 – Фотография поверхности WP (алюминий), расположенной на расстоянии 50 мм за пробиваемым экраном. Скорость ударника 5,15 км/с. Угол столкновения $\theta = 30^\circ$.

Характер нитевидных отпечатков на второй пластине и их интенсивность зависит от скорости ударника и угла встречи с мишенью. Эксперименты показали, что имеется также зависимость и от толщины первой пластины - с ее ростом их становится меньше и падает также их ширина и глубина. Зоны на второй пластине, в которых отмечаются нитевидные эрозионные участки, всегда сопровождаются некоторым темным налетом, хотя области, где присутствуют только микрократеры, как правило, свободны от него. Тщательный анализ лазерных теневых снимков показал, что в некоторых случаях в разлетающемся облаке мелкодисперсных частиц можно выявить нитевидные структуры, причем, как правило, они проявляются на периферии факела. По всей видимости, имеется тесная связь между нитевидными участками поражения второй пластины и этими структурами.

Полученная совокупность экспериментальных данных позволяет выдвинуть следующее объяснение причины появления нитевидных участков на второй пластине. В начальные моменты удара кубика по алюминиевой пластине со скоростью $V_k \geq 2C_{л}$ ($C_{л}$ - скорость звука в поликарбонате) по нему начинает идти сильная ударная волна (УВ), которая так нагружает материал во фронтальной части ударника, что в волне разгрузки он практически полностью испаряется. Для тонких мишеней разлет материала из образующегося отверстия и раз-

грузка фронтальных частей начинаются раньше, чем УВ в кубике достигает его тыльной части, в силу чего интенсивность УВ падает. В силу этого материал тыльной части ударника не претерпевает полного испарения и какая-то его часть сохраняется в виде нитей из расплавленного поликарбоната. При ударе по второй пластине эти нити и дают характерные отпечатки. Ясно, что неиспарившийся материал из тыльной части при ударе под углом будет иметь вектор скорости, близкий к первоначальному направлению движения, в силу чего нитевидные участки поражения второй пластины будут сосредоточены в зонах, близких к точке "Т". С ростом толщины первой пластины, разгрузка начинается позже и доля неиспарившегося материала в тыльной части ударника уменьшается. Тот же эффект наблюдается и при больших θ (при $\theta=60^\circ$ эффективная толщина пластины возрастает вдвое). Наблюдается также зависимость интенсивности нитевидных зон поражения от начальной скорости ударника. С ее ростом нитевидные зоны выражены слабее.

В целом можно сделать вывод, что разработанный в ФТИ малогабаритный рельсовый ускоритель является удобным средством для постановки экспериментов по исследованию высокоскоростных соударений.

Работа была поддержана Программой Президиума РАН П-12 и грантом РФФИ 09-08-00964-а.

Статья подготовлена по материалам доклада IX Международной научной конференции «Импульсные процессы в механике сплошных сред» (15-19 августа 2011, г. Николаев).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.М.Микиша, Л.В.Рыхлова, М.А.Смирнов. Загрязнение космоса. Вестник РАН, 2001, т.71, в.1, с.26-31.
1. Б.Г.Жуков. Компактные рельсовые ускорители плазмы и твердых тел (Обзор). Материалы Международной научной конференции "Физика импульсных разрядов в конденсированных средах", Николаев, 17-21 августа 2009, с.101-103.
1. Э.М.Дробышевский, Б.Г.Жуков, В.А.Сахаров. Измерение высоких скоростей тел малых геометрических размеров. Письма в ЖТФ, 1993, т.19, №17, с.44-47.

Канд. техн. наук А.В. Мельник,
д-р техн. наук В.М. Грабовый,
д-р техн. наук А.В. Иванов
(ИИПТ НАН Украины, Николаев)

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО
ГЕНЕРАТОРА УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

За результатами чисельних та експериментальних досліджень проведено систематизацію і описано конструктивні особливості електророзрядного генератора пружних коливань, визначено їхній взаємозв'язок з ефективністю дії. Запропоновано рекомендації щодо подальшого удосконалення електророзрядного генератора пружних коливань.

**TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES OF ELECTRO-DISCHARGE
GENERATOR OF ELASTIC OSCILLATIONS FOR
ELECTROHYDROPULSE TREATMENT OF METALS AND ALLOYS**

Upon the results of numerical and experimental research the systematization is compiled and design features of electro-discharge generator of elastic oscillations are described; their interconnection with the influence efficiency is ascertained. Recommendations are offered for further improvement of electro-discharge generator of elastic oscillations.

В современных условиях металлургического передела проблема повышения качества литого металла решается путем активной электрогидроимпульсной обработки (ЭГИО) расплава металлов и сплавов при использовании электрогидравлических модульных установок [1–3]. Важнейшим технологическим узлом таких установок является электроразрядный генератор упругих колебаний (ЭРГУК). Принцип работы ЭРГУК основан на использовании эффектов, проявляющихся при высоковольтном электрическом разряде в воде. В общем случае ЭРГУК представляет собой разрядную камеру мембранного типа, заполненную рабочей жидкостью. Разрядная камера выполнена в виде толстостенного цилиндра с верхним жестким и нижним упругим основаниями. Между электродом, расположенным на оси камеры, и упругим основанием происходит электрический разряд. При этом в рабочей жидкости камеры возникает волна давления, которая деформирует нижнее основание. В свою очередь, нижнее основание передает энергию волноводу, погруженному в ковш с расплавом. Таким образом, возмущения от волновода генерируют в жидком металле нестационарное поле давлений, которое инициирует в расплаве физические процессы, оказывающие положительное воздействие на качество структуры отливок. Общая схема обработки изображена на рис.1. Фотография установки модели УВ12 для ЭГИО пяти тонн расплава представлена на рис. 2.

Ударно-волновое воздействие при ЭГИО – это эффективный способ создания экстремальных состояний исходного вещества, в результате которого существенно изменяется структура и свойства расплава, что обеспечивает получение новых свойств материалов в литом изделии. Конечный результат ЭГИО в значительной степени определяется условиями протекания высоковольтного разряда в ЭРГУК, которые зависят от его конструкции. Вместе с тем, научных результатов, отражающих современный уровень разработок ЭРГУК, опублико-