

УДК 621.316.549  
621.3.732.16

# Металлографический и расчетно- теоретический анализ явлений зарождения откола в AL 1100-O по экспериментам серии R-Damage

В. В. Авдошин, С. В. Балашов,  
Б. Т. Егорычев, В. А. Васюков,  
Г. И. Волков, А. М. Глыбин,  
Ю. Н. Горбачев, П. В. Дудай,  
В. А. Иванов, А. В. Ивановский,  
Н. Ю. Илюшкина, Г. В. Карпов,  
В. Е. Коломийцев, А. И. Краев,  
В. Б. Куделькин, А. И. Кузяев,  
И. В. Морозов, С. С. Надежин, С. В. Пак,  
А. А. Петрухин, Ю. В. Савцова,  
А. Н. Скобелев, О. А. Тюпанова,  
Б. Д. Андерсон<sup>1</sup>, У. Л. Атчисон<sup>1</sup>,  
Э. М. Коул<sup>1</sup>, М. Салазар<sup>1</sup>, Д. Родригес<sup>1</sup>,  
Р. Э. Рейновски<sup>1</sup>, Л. Д. Табака<sup>1</sup>,  
Д. Т. Уэстли<sup>1</sup>

*В докладе представлены результаты применения взрывомагнитного источника импульсной мощности, разработанного на основе стирального ВМГ с взрывными размыкателем тока и прерывателем тока, в экспериментах по исследованию откольных механизмов повреждения твердых веществ в условиях сходящейся осесимметричной геометрии нагружения образцов ударом цилиндрического лайнера, разгоняемого до скоростей 0,2–1 км/с.*

## Введение

ВНИИЭФ и LANL наметили [1] проведение серии из десяти совместных экспериментов R-Damage по изучению откольных механизмов в сходящейся геометрии с использованием взрывомагнитного устройства в качестве драйвера цилиндрического алюминиевого лайнера, создающего осесимметричное ударное воздействие на исследуемую мишень. Применение цилиндрических лайне-

<sup>1</sup> Лос-Аламосская национальная лаборатория, Нью-Мексико, США.

ров, разгоняемых с помощью магнитного поля до скоростей 0,2–1 км/с, дает уникальную возможность исследования механизмов разрушения материалов в сходящейся геометрии [1, 2], в которой могут возникать новые эффекты повреждения, например, из-за многомерности условий нагружения.

В настоящей работе рассмотрены некоторые элементы стенда с взрывомагнитным источником импульсной мощности (ВИИМ) [3], разработанным на основе спирального ВМГ с взрывными размыкателем и прерывателем тока (РТ и ПТ), представлены результаты первых экспериментов.

ВИИМ позволяет формировать в нагрузке (состоящей из двух последовательно соединенных лайнерных пондеромоторных узлов с исследуемыми мишенями) импульсы тока амплитудой от 5 МА до 20 МА, трапецидальной формы, с медленно спадающей (квазипостоянной) вершиной, при полной длительности по основанию от 10 до 30 мкс и длительностями фронтов около 2 мкс.

Импульс тока с короткой длительностью требуется для обеспечения "зануления" тока через лайнер до его удара по мишени для возможности сравнения с результатами, полученными на плоских пластинах, разгонявшихся на газовых пушках. Надо, чтобы лайнер после достижения пиковой скорости до удара по мишени летел по инерции. Длинный импульс необходим при исследовании режима компактирования образующихся полостей повреждения.

Магнитный поток из ВИИМ передается в нагрузку, установленную за бронеплитой, по аксиальной передающей линии (ПЛ) длиной ~ 2,2 м. Во внутреннем токопроводе ПЛ установлено устройство защиты нагрузки от взрывного и ударного воздействия ВИИМ. В состав стенда входит также рентгенографическая система для диагностики состояния лайнера и мишеней с устройствами защиты ее элементов от осколочного и ударного воздействия от ВИИМ.

На стенде было проведено несколько экспериментов. Первый эксперимент проводился с эквивалентной нагрузкой с целью проверки работы узлов ВИИМ и систем защиты лайнерной нагрузки и рентгенографической диагностики. Три опыта R-Damage-0,1,2 были выполнены уже с исследованием мишеней в гидродинамическом режиме при токе через лайнер около 5 МА и длительности импульса по основанию 10 мкс. Три эксперимента R-Damage-3,4,5 проведены в режиме дожатия мишени лайнером при длинном импульсе тока 24 мкс с амплитудами до 7 МА.

### *Лайнерный пондеромоторный узел для R-Damage-0,1,2*

Конструктивная схема лайнерного пондеромоторного узла (ПУ), применявшегося в эксперименте R-DAMAGE-1, показана на рис. 1 [2].

Наличие в ВИИМ большого запаса энергии позволяет устанавливать в нагрузке в каждом эксперименте по два последовательно соединенных ПУ с индивидуальными мишенями. Параметры ПУ в экспериментах R-Damage-0,1,2 выбирались для решения двух физических целей:

- исследовать начальную область откольного повреждения для получения информации об образовании пустот, их росте и соединении;
- изучить, как пластическая работа и другие эффекты рассеивания энергии влияют на распространение ударной волны в исследуемом материале мишени.

Для облегчения сравнения с подобными экспериментами, проведенными на установке ATLAS, в R-Damage-0,1,2 лайнер из алюминия (Al 1100-O) имел толщину 2 мм при начальном внешнем радиусе – 50 мм (мишени во всех опытах были выполнены из того же материала). Выбор начального радиуса лайнера был обусловлен требованиями: иметь при выбранной амплитуде тока 5 МА не слишком большое время между началом движения лайнера и его ударом по мишени для облегчения выбора диагностических моментов времени; получить скорость лайнера в момент его удара по мишени, при которой начинают зарождаться повреждения в материале мишени.

Из экспериментов с плоским нагружением мишеней из Al 1100-O известно [1, 2], что возникновение повреждений начинается при скорости лайнера  $204 \text{ м/с} \pm 3 \%$ . Эксперименты

R-Damage-0,1 были ориентированы на определение изменения этого диапазона по скорости при цилиндрической геометрии нагружения. Получение скоростей лайнера с вариацией в  $\pm 3\%$  накладывает достаточно жесткие требования по интегралу тока, обеспечиваемого ВИИМ на лайнере. Эксперимент R-Damage-0 был направлен также на сравнение экспериментальной скорости движения лайнера с расчетной скоростью. Для этого один из лайнерных узлов в этом эксперименте был сделан без мишени. Для определения в экспериментах R-Damage-0,-1 диапазона по скорости, в котором возникают начальные повреждения материала мишени, были выбраны следующие ее радиусы:

R-Damage-0:  $R_{M1} = 44$  мм (пробег лайнера перед ударом 4 мм);

R-Damage-1:  $R_{M1} = 43$  мм (пробег лайнера перед ударом 5 мм),  $R_{M2} = 45$  мм (пробег лайнера перед ударом 3 мм). Толщина мишеней в экспериментах R-Damage-0,1 была одинакова, 20 мм.

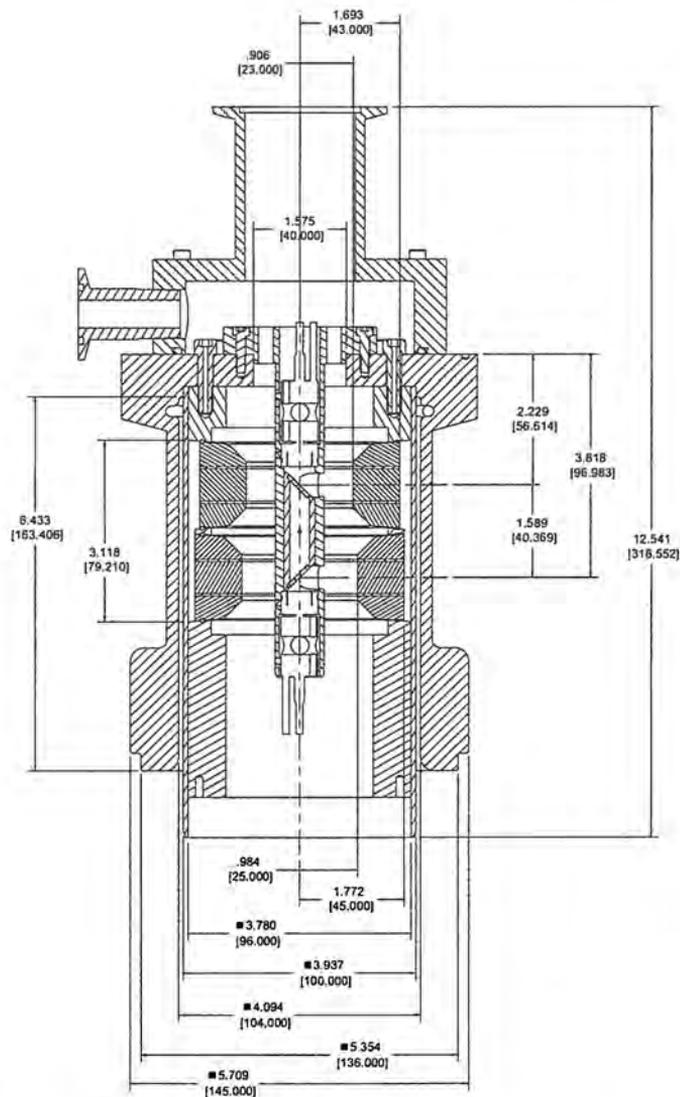


Рис. 1. Конструктивная схема лайнерного пондеромоторного узла

Так как эксперимент R-Damage-2 был направлен на достижение второй физической цели, то обе мишени в нем имели одинаковый внешний радиус (для обеспечения идентичности удара лайнера)  $R_{M1} = R_{M2} = 46$  мм (пробег лайнера перед ударом 2 мм), а толщины мишеней  $L_{M1} = 20$  мм и  $L_{M2} = 10$  мм.

### **Устройство защиты нагрузки от взрывного и ударного воздействия ВИИМ**

Наружный токопровод ПЛ со стороны нагрузки с помощью стальных стержней-шпилек и колец крепится к бронеплите.

Для защиты лайнерной нагрузки от осколочного и ударного воздействия, возникающего при детонации ВВ в СВМГ (спиральном взрывомагнитном генераторе) и размыкателях тока, во внутреннем токопроводе передающей линии устанавливаются два стальных отражателя продуктов взрыва 1 массой 24 кг каждый с конусными поверхностями (рис. 2). Первый отражатель (слева на рис. 2) приходит в движение под воздействием продуктов взрыва на обращенную в сторону СВМГ конусную поверхность. Своей второй конусной поверхностью (со значительно меньшим углом раствора) этот отражатель раздвигает лепестки алюминиевой втулки 2, установленной на резьбе в полости внутреннего токопровода 3 ПЛ. Производится заклинивание отражателя в полости токопровода 3 и внутреннего 3 с внешним 4 токопроводами ПЛ между собой. Для дополнительного гашения кинетической энергии, приобретенной первым отражателем, последовательно с ним смонтирован аналогичным образом второй отражатель. Между ними установлена медная труба 5 с поперечными надрезами, деформация которой помогает гасить кинетическую энергию первого отражателя. Импульс, приобретенный внутренним токопроводом ПЛ с отражателями, передается через радиальную поверхность изолятора ПЛ 6 к торцевой части обратного токопровода 7 лайнерной нагрузки. Токовый контакт торцевой части токопровода 7 с наружным токопроводом ПЛ 4 (скрепленного с бронеплитой) осуществляется по посадке цилиндрических поверхностей через раздавливаемое кольцо 1 из мягкого Al (рис. 3). Контакт лайнера 2 с внутренним токопроводом 3 производится с помощью цанги 4. Поэтому лайнерная нагрузка вместе с обратным токопроводом (торцевой и цилиндрической частями) легко отделяется от ПЛ и отлетает в мешки с опилками.

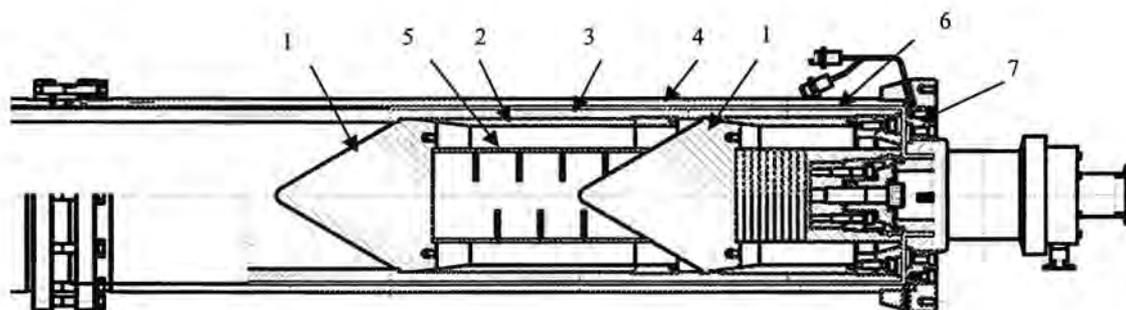


Рис. 2. Конструктивная схема защиты лайнерного пондеромоторного узла от взрывного воздействия ВИИМ

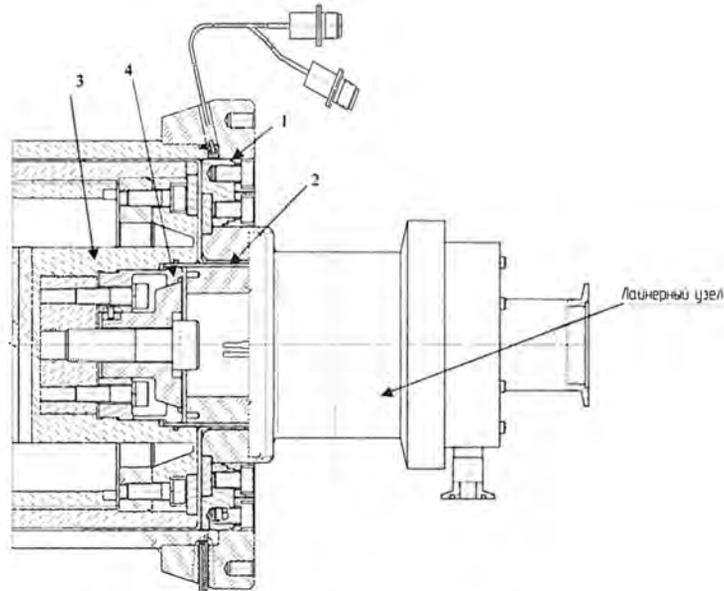


Рис. 3. Схема соединения лайнерной нагрузки с ПЛ

### Результаты гидродинамических экспериментов R-Damage-0,1,2

Во всех экспериментах были сохранены испытывавшиеся мишени от взрывного воздействия ВИИМ. Индукционными В-dot датчиками ВНИИЭФ и фарадеевскими датчиками LANL зарегистрированы импульсы токов в узлах ВИИМ. Получены рентгеновские снимки состояния лайнера перед его ударом по мишеням (рис. 4,а). С помощью Visar зарегистрированы зависимости от радиуса скорости лайнера (только в R-D-0) и скорости внутренней поверхности мишеней (измерения выполнялись во всех опытах). На рис. 4,б приведена фотография лайнерного узла после проведения эксперимента R-D-1. Повреждения его поверхности отсутствуют. На краю лайнера (левая часть снимка) виден четкий азимутально-симметричный след токового контакта.



Рис. 4. Снимки лайнерных ПУ: а – рентгеновские снимки ПУ в R-D-0; б – фотография ПУ после эксперимента R-D-1

На рис. 5,а показаны усредненные зависимости тока от времени в лайнере, построенные по сигналам с индукционных датчиков ( $t = 0$  соответствует началу запуска СВМГ от подрывной установки ВУ-19-1). При длительности импульса на полувысоте  $\sim 7,9$  мкс время нарастания тока с уровня 0,1 до уровня 0,9 мкс составляет  $\sim 1,5$  мкс, а время спада – 2,4–2,5 мкс.

Основные начальные параметры нагрузок и экспериментальные данные по всем трем опытам сведены в табл. 1. Из нее следует, что усредненное значение амплитуды тока по В-dot датчикам соответствует верхней границе доверительного интервала, полученного по фарадеевским датчикам.

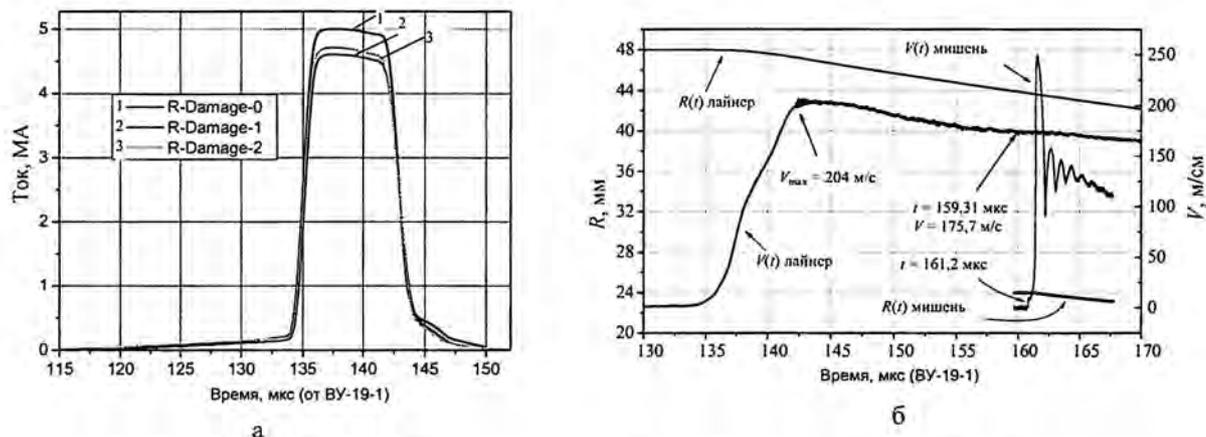


Рис. 5. Зависимости от времени: а – тока по лайнеру в R-D-0,1,2; б – скорости и внутреннего радиуса лайнера и мишени в R-D-0

Таблица 1

Характеристики нагрузок в R-Damage-0,1,2

Параметры	R-D-0	R-D-1	R-D-2
Амплитуда тока (усредненное значение по В-dot), МА	5	4,6	4,71
Амплитуда тока (Faraday probes), МА	4,6–4,9	4,4–4,55	4,4–4,7
База полета $d$ лайнера из Al-1100 ( $\Delta_0 = 2$ мм, $R_0 = 48$ мм) до мишеней (M1 и M2), мм	4 (до M1)	5 (до M1) 3 (до M2)	2 (до M1 и M2)
Максимальная скорость лайнера, м/с	204	не измерялась	не измерялась
Скорость удара лайнера по мишени, м/с	175	не измерялась	не измерялась
Толщина мишени, мм	20	20	20 (M1), 10 (M2)
Максимальные скорости внутренней поверхности мишеней (M1 и M2), м/с	250 (M1)	182 (M1), 210 (M2)	184 (M1), 203 (M2)
Минимальные скорости внутренней поверхности мишеней (M1 и M2), м/с	80,5 (M1)	30 (M1), 60,4 (M2)	41 (M1), 56,8 (M2)
Расстояние от поверхности удара до мест разрушения, мм	17,8	17-17,5 (M1), 17,2 (M2)	17,7 (M1), 7,6 (M2)
Длина повреждения, мм	11,36	8,6-9,9 (M1), 7,2 (M2)	11,17 (M1), 12,4 (M2)
Характеристика повреждения мишени	Полный откол	Зарождение повреждений (M1). Макротрещина (M2).	Прерывистая макротрещина (M1). Прерывистая макротрещина (M2).

Оказалось, что результаты удара лайнера по мишени в цилиндрической геометрии существенно отличаются от соударения пластины с плоской мишенью. На рис. 5,б показана динамика разгона лайнера, его торможения и взаимодействия с мишенью в R-D-0. Максимальная скорость лайнера составила 204 м/с ( $t = 142,78$  мкс, время от ВУ-19-1). Ускорение лайнера до максимальной скорости произошло на базе менее 1 мм. Сравнение рентгенограммы положения лайнера на момент времени  $t = 155$  мкс с импульсом тока свидетельствует о том, что в момент подлета лайнера на радиус мишени ( $t = 159,38$  мкс) ток по лайнеру уже не протекает. К этому моменту скорость лайнера снизилась до 175,7 м/с, тем не менее в мишени наблюдался полный откол с шириной повреждения 2,8–3,2 мм и длиной 11,36 мм.

В эксперименте R-D-1 амплитуда тока была уменьшена. В мишени 2 (при  $d = 3$  мм) получено разрушение в виде макротрещины. Зарегистрированная структура повреждения в мишени 1 (при  $d = 5$  мм) имеет неоднородность по азимутальному углу  $\Theta$  (рис. 6,а). При угле  $\Theta = 90^\circ$  повреждение представляет собой прерывающуюся трещину, переходящую по краям в макрополости и поры. Ширина зоны повреждения при  $\Theta = 90^\circ$  составляет 1,2–1,4 мм. Расстояние от внутренней поверхности мишени до центра зоны равно 2,2–2,3 мм. При угле  $\Theta = 180^\circ$  зарегистрирована начальная стадия зарождения повреждения, состоящего из пор диаметром от 20 до 100 мкм, слившихся пор в макрополости и разрушений в виде микротрещин. На рис. 6,б–в приведены фотографии микроструктуры из зон повреждения мишени 1. На рис. 6,б видна область сильной локальной пластической деформации материала вокруг макрополости, ограниченная микротрещиной овальной формы, по границам которой в дальнейшем происходит выкрашивание материала с образованием большей по размеру полости. На рис. 6,в видно зарождение подобной микротрещины. При этом зарождение микротрещин происходит не только по границам зерен, как наиболее слабого места в металлах, но и по их телу.

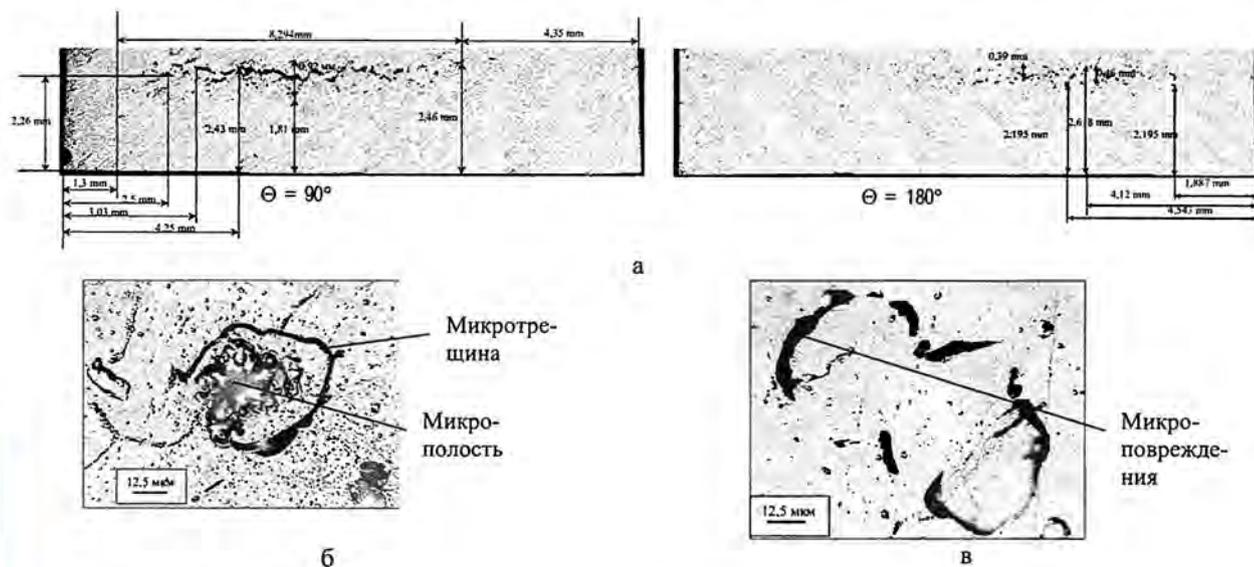


Рис. 6. Микроструктура материала в зоне разрушения в образце R-D-1-1:  
 а – общий вид (внутренняя граница мишени внизу); б – с микротрещиной вблизи макрополости;  
 в – возникновение микроповреждений

Микроструктура вне зоны повреждения для шлифов из мишеней с макротрещинами состоит из сильно деформированных зерен, расположенных под углом 40–45° к внешней поверхности мишеней. По мере приближения к месту повреждения угол наклона зерен увеличивается до

55–65°. Большую часть шлифов занимают зерна шириной от 80 до 200 мкм и длиной от 250 до 900 мкм. Значения микротвердости материала мишеней находились в пределах от ~ 30 до ~34 кгс/мм<sup>2</sup>, что соответствует твердости Al в деформированном состоянии (в исходном состоянии – 28,5 кгс/мм<sup>2</sup>).

### Исследование повреждений в мишенях при их взаимодействии с лайнером, сжимаемым длинным импульсом тока

Для понимания, как в последующих экспериментах реализовать и исследовать режим компактирования образующихся в мишени полостей разрушения, были проведены эксперименты R-Damage-3,4,5, в которых процессы зарождения в мишени дефектов в виде микропустот, их развитие из-за возникающих растягивающих усилий происходили под воздействием лайнера, сжимаемого импульсом тока повышенной длительности. Динамика движения лайнера и мишеней (все из Al 1100-O), зарегистрированная в опытах, радиусы остановки внутренних поверхностей мишеней и зарождение повреждений сравнивались с результатами численного моделирования по программному комплексу ДРАКОН [4], разработанному для расчета упругопластических течений при ударно-волновом нагружении в двумерном и трехмерном приближениях.

Лайнер имел толщину 4 мм при начальном внешнем радиусе 50 мм. Мишени во всех опытах были выполнены с одинаковой толщиной 6 мм. Амплитуды импульсов тока в опытах составляли 5,5–5,6 МА, 6,1 МА, 7,0 МА (по V-dot и фарадеевским датчикам) при длительности ~ 24 мкс. Такие параметры были выбраны для обеспечения следующих условий в экспериментах:

- удар лайнера по мишени должен происходить на стадии его ускорения при малой базе полета порядка 0,5 мм;
- внутренняя граница мишени должна остановиться до достижения радиуса центрального измерительного блока.

Схема исследований и импульс тока в опыте R-Damage-5 показаны на рис. 7. Полученные скорости удара лайнера по мишеням во всех трех опытах представлены в табл. 2.

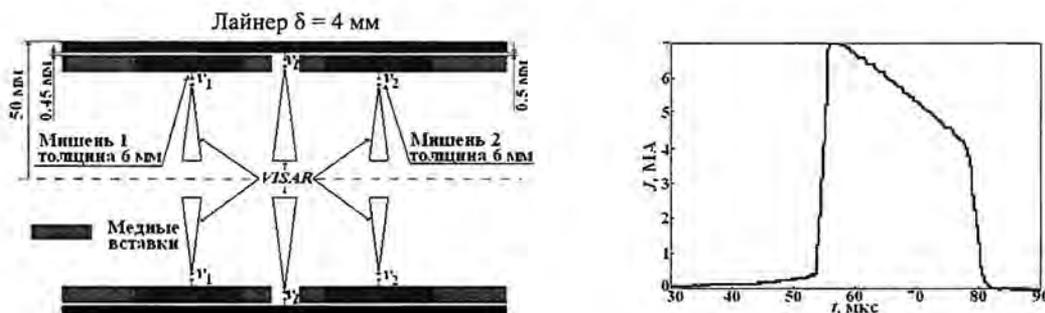


Рис. 7. Схема исследований в опыте R-Damage-5 и сила тока (фарадеевский датчик) в лайнере

Таблица 2

Скорости удара лайнера по мишеням						
Опыт	R-D-3		R-D-4		R-D-5	
Мишень	1	2	1	2	1	2
$V_{уд}$ , м/с	135,4	142,5	120,6	127,6	161,2	169,7

В расчетах была использована феноменологическая модель прочности со стационарным пределом текучести  $Y_S$  [5] в виде функции трех переменных: накопленной пластической деформации  $\varepsilon_i^p$ , температуры  $T$ , "холодного" давления  $P$ , характеризующих напряженно-деформированное состояние среды:

$$Y_S = Y_0 \left[ 1 + a_0 (1 - \bar{T}^m) \left( 1 - \exp(-b_0 \varepsilon_i^p) \right) \right] \left[ 1 - \bar{T}^n \right] \left[ 1 + c_0 P \right]. \quad (1)$$

В выражении (1):  $Y_0, a_0, m, n, b_0, c_0$  – параметры модели (постоянные величины), подбираемые на основе экспериментальных данных, исходя из условия наилучшего их описания,  $\bar{T} = T/T_m$  – гомологическая температура,  $T_m$  – температура плавления ( $T_m$  и  $T$  выражаются в шкале абсолютной температуры).

Модуль сдвига, определяющий девиаторную составляющую тензора напряжения в упругой области деформации, рассчитывается по формуле

$$G = \frac{3}{2} \frac{1 - 2\nu}{1 + \nu} \rho C_B^2, \quad C_B^2 = \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_S, \quad (2)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $\rho$  – плотность вещества,  $C_B$  – текущая объемная скорость звука. Коэффициент Пуассона  $\nu$  принимается зависящим только от безразмерного параметра  $\bar{T}$  и записывается в виде

$$\nu = \begin{cases} \nu_0 \left( 1 + C(\bar{T})^K \right), & \bar{T} < 1 \\ 0,5, & \bar{T} \geq 1 \end{cases}, \quad (3)$$

где  $\nu_0, C, K$  – постоянные коэффициенты.

Температура плавления  $T_m$  определяется по закону Линдемана: при начальных условиях  $T = T_{0m}, \delta = \delta_{0m}$  уравнение кривой плавления в  $(\delta - T)$  плоскости есть

$$T_m = T_{0m} \left( \frac{\delta_m}{\delta_{0m}} \right)^{2 \left( \Gamma_\infty - \frac{1}{3} \right)} \exp \left[ \frac{2(\Gamma_0 - \Gamma_\infty)}{M(\delta_{0m})^M} - \frac{2(\Gamma_0 - \Gamma_\infty)}{M(\delta_m)^M} \right], \quad (4)$$

где  $\delta_{0m} = \rho_{0m}/\rho_{0kp}$  – относительная плотность вещества при  $T = T_{0m}$  (состояние "solidus"),  $T_{0m}$  – температура плавления при нормальном давлении.

При  $T/T_m \geq 0, \nu = 0,5$ .

Шаровая составляющая тензора напряжений для алюминия представляется в форме Ми – Грюнайзена:

$$P = \frac{\rho_{0k} C_{0k}^2}{n} (\delta^n - 1) + \Gamma_p \rho E_T, \quad (5)$$

$$E = \frac{C_{0k}^2}{n} \left[ \frac{\delta^{n-1}}{n-1} + \frac{1}{\delta} - \frac{n}{n-1} \right] + E_T.$$

В выражении (5)  $\rho_{0k}, C_{0k}$  – плотность и скорость звука при  $T = 0$  К,  $\Gamma_p$  – коэффициент Грюнайзена,  $\delta = \rho/\rho_{0k}$  – относительное сжатие.

Коэффициент Грюнайзена  $\Gamma_p$  в выполненных расчетах считается функцией только плотности (или относительного сжатия  $\delta$ ).

$$\Gamma_p = \Gamma_\infty + \frac{\Gamma_0 - \Gamma_\infty}{\delta^M},$$

где  $\Gamma_0$  – величина  $\Gamma_p$  при  $\rho = \rho_{0k}$  и  $\Gamma_\infty = \Gamma_p$  при  $\delta \rightarrow \infty$ .

Параметры модели прочности и УРС для алюминия 1100 приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Параметры модели прочности алюминия

Модель	$Y_0$ , ГПа	$a_0$	$b_0$	$m$	$c_0$ , 1/ГПа	$n$	$\nu_0$	$C$	$K$
M1	0,05	1,4	15,0	1,0	0,2	1	0,35	0,0	1,0
M2	0,05	7,0	3,0	1,0	0,2	1	0,35	0,0	1,0

Таблица 4

Параметры уравнений (5) алюминия

$\rho_{0k}$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$C_{0k}$ , км/с	$n$	$\Gamma_\infty$	$\Gamma_0$	$M$	$C_{\nu}$ , Дж/г*К	$\delta_{0m}$	$\frac{T_{0m}}{K}$
2,79	2,74	5,15	3,2	0,67	2,14	1,5	0,9238	0,92	933

В результате расчетно-теоретического анализа проведенных опытов R-D-3,4,5 получены численные значения параметров вышеприведенной модели, с использованием которых в единой манере удалось достичь удовлетворительного описания как движения мишени вплоть до остановки, так и полета лайнера до соударения с мишенями (рис. 8, 9). Результаты численного моделирования и экспериментов по величине радиуса остановки мишеней сравниваются на рис. 8. Видно, что наблюдается хорошее согласие расчета с экспериментом в пределах экспериментальной погрешности.

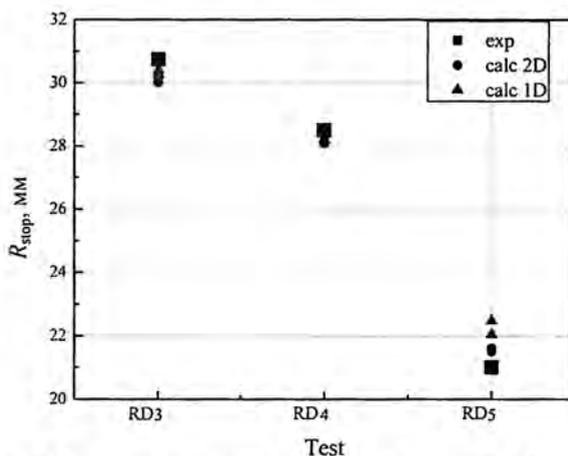


Рис. 8. Радиусы остановки мишеней в опытах R-D-3-4-5

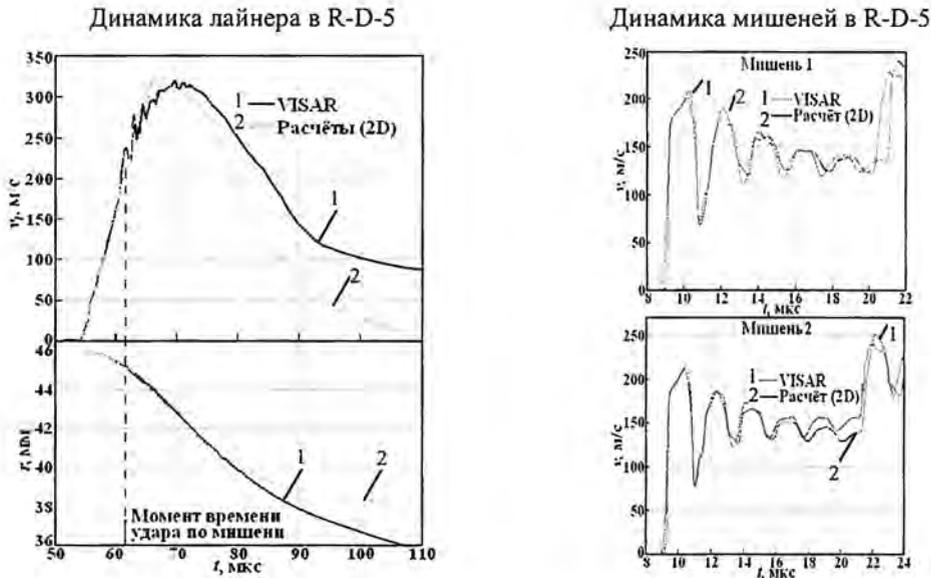


Рис. 9. Сравнение результатов опыта R-Damage-5 с расчетами

Наблюдающееся отличие в динамике лайнера после достижения им максимальной скорости (рис. 9) связано с тем, что в экспериментах для регистрации скорости движения лайнера в медных вставках (см. рис. 7) выполнялось специальное окно размером  $10 \times 10$  мм, и, следовательно, напряженно-деформированное состояние лайнера в этой области регистрации скорости является трехмерным.

Для моделирования откольного разрушения использовалась двухстадийная кинетическая модель откольного разрушения типа модели NAG [6]. В этой модели процесс разрушения рассматривается как зарождение и развитие поврежденности в виде микродефектов, распределение которых в материале подчиняется статистическим законам. Ниже приведены основные уравнения модели для случая вязкого разрушения.

Распределение дефектов по размерам

$$N_m(R) = N_0 \exp(-R/R_m), \tag{6}$$

Зарождение дефектов

$$\frac{dN_0}{dt} = \dot{N}_0 \exp\left(\frac{\sigma_S - \sigma_{n0}}{\sigma_1}\right) \Theta(\sigma_S - \sigma_{n0}). \tag{7}$$

Развитие дефектов

$$\frac{dR_m}{dt} = \frac{\sigma_S - \sigma_{g0}}{4\eta} R_m \Theta(\sigma_S - \sigma_{g0}), \tag{8}$$

В уравнениях (6–8)  $N_0$  – общее количество пор в единице объема,  $N_m$  – количество пор в единице объема с радиусом, большим  $R_m$ ,  $R$  – радиус поры,  $R_m$  – параметр распределения,  $\dot{N}_0$ ,  $\sigma_{n0}$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_{g0}$ ,  $\eta$  – постоянные;  $\sigma_{n0}$  – пороговое значение напряжения, ниже которого в среде не про-

исходит образование микропор;  $\sigma_{g0}$  – пороговое значение напряжения, ниже которого в среде не происходит развитие микропор,  $\eta$  – константа, по размерности и физическому смыслу аналогичная вязкости материала;  $\Theta$  – функция Хевисайда,  $\sigma_s = -P_s$  – напряжение в твердом теле. Мера объемной поврежденности  $\omega = \frac{V_d}{V_d + V_s}$ , где  $V_d$  – объем дефектов,  $V_s$  – объем сплошной составляющей, может быть получена вычислением суммарного объема пор:

$$\frac{d\omega}{dt} = 8\pi R_m^3 \frac{dN}{dt} + 3\omega \frac{dR_m}{dt}$$

Таким образом, разрушение в рассматриваемой кинетической модели определяется параметрами  $\dot{N}_0$ ,  $\sigma_{n0}$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_{g0}$ ,  $\eta$ ,  $R_0 = \text{Min}(R_m)$ , из которых первые три контролируют зарождение дефектов, а последующие три – их развитие под действием растягивающих напряжений.

Параметры кинетической модели, для описания откольного разрушения алюминия 1100, перечислены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры кинетической модели алюминия 1100

$\sigma_{n0}$ , ГПа	$\sigma_{g0}$ , ГПа	$\sigma_1$ , ГПа	$\dot{N}_0$ , см <sup>-3</sup> ·с <sup>-1</sup>	$\eta$ , Па·с	$R_0$ , см
0,5	0,27	0,04	$0,3 \cdot 10^{10}$	60,0	$1,0 \cdot 10^{-4}$

Поврежденное вещество рассматривается как двухкомпонентная среда, состоящая из сплошного вещества и пор (пустот), рост и зарождение которых описываются уравнениями кинетики. При этом для сплошного вещества является вполне логичным использовать обычные уравнения связи.

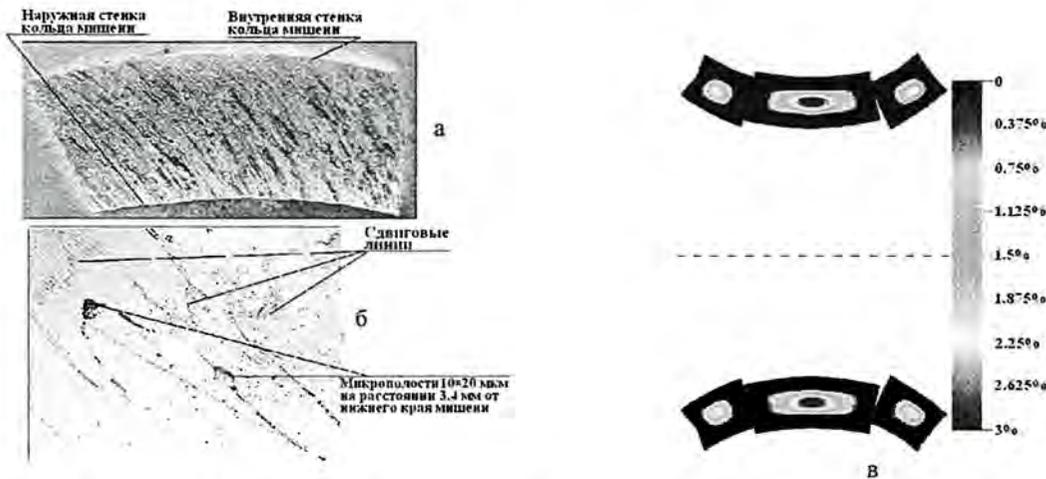


Рис. 10. Опыт R-D-5, мишень 2: а – исследуемый образец после опыта, б – при увеличении в 400 раз (поврежденность 3–4 %); в – расчетное распределение поврежденности в мишени

Адекватное описание зависимости  $W(t)$  для R-D-5 на этапе развития откольного разрушения потребовало уменьшения значения порога зарождения поврежденности ( $\sigma_{n0}$ ) до величины 0,5 ГПа. По расчету откольное разрушение в мишенях, наблюдаемое в опыте R-D-5, соответствовало уровню возникающей поврежденности порядка 3–4 %, что было близко к поврежденности мишени в эксперименте (рис. 10).

### *Заключение*

Эксперименты R-Damage-0-5 продемонстрировали применимость взрывомагнитных устройств в исследованиях откольных явлений.

### Список литературы

1. Kaul Ann M. An Experimental Series to Study Spallation Damage in Cylindrical Geometry // Khariton Topical Readings "Extreme States of Substance; Detonation; Shock Waves". – Sarov, RF, 14–18 March, 2005.
2. Kaul Ann M. Final Design Review R-Damage – 0, 1, 2 // Report LANL. Presented at Sarov, RF, 7, March, 2005.
3. Duday Pavel. V. et al. Quasitrapezoidal Shape Current Pulse Former Experimental series "R-Damage" // IEEE 2007. P. 459–464.
4. Абакумов А. И., Низовцев П. Н., Певницкий А. В., Соловьев В. П. Программный комплекс ДРАКОН для расчета упругопластических течений при ударно-волновом нагружении в двумерном и трехмерном приближении // Тр. Междунар. конф. "V Забабахинские чтения". 1995. С. 227.
5. Раевский В. А., Лебедев А. И., Апрельков О. Н., Игонин В. В., Игнатова О. Н., Князев В. Н., Сидницына С. Н., Подурец А. М., Надежин С. С., Низовцев П. Н. и др. Исследования влияния сдвиговой прочности на развитие возмущений в меди при высоких давлениях. Итоговый отчет по соглашению № 37713-000-02-35 ТЗ №002 модификация 01 между ВНИИЭФ и ЛАНЛ. 2005 г., 163 стр.
6. Seaman L., Curran D., Shockey A. Computational models for ductile and brittle fracture // J. Appl. Phys. 1976. Vol. 47, N 11. P. 4814–4826.

## **Metallographic and Calculated-Theoretical Analysis of Spallation Nucleation in Al 1100-O According to Experimental Series R-Damage**

V. V. Avdoshin, S. V. Balashov, B. T. Egorychev, V. A. Vasyukov, G. I. Volkov,  
A. M. Glybin, Yu. N. Gorbachev, P. V. Duday, V. A. Ivanov, A. V. Ivanovsky,  
N. Yu. Ilushkina, G. V. Karpov, V. E. Kolomijtsev, A. I. Kraev, V. B. Kudelkin,  
A. I. Kuzyaev, I. V. Morozov, S. S. Nadezhin, S. V. Pak, A. A. Petrukhin,  
Yu. V. Savtsova, A. N. Skobelev, O. A. Tupanova, B. G. Anderson,  
W. L. Atchinson, A. M. Kaul, M. Salazar, G. Rodrigues, R. E. Reinovsky,  
L. Tabaka, D. T. Westley

*The report presents the results of implementation of explosive magnetic source of pulsed power (VIIM), designed on the basis of spiral EMG with explosive circuit breaker and current interrupter. The experiments were to study spallation mechanisms of solid substances damage in converging axial-symmetric geometry of sample loading by the shock of a cylindrical liner, accelerated up to 0,2–1 km/s.*