

Эффекты множественного соударения

З. В. ТАНАКОВ, Э. Э. ЛИН

Одной из задач механики деформируемых сред является исследование процессов высокоскоростного соударения группы тел с преградой. Как в экспериментальном, так и в теоретическом плане этой проблеме до сих пор уделялось мало внимания. Такое положение связано со сложностью процесса множественного удара для физического и математического моделирования. На практике сложно реализовать управляемое метание группы тел с требуемым распределением скоростей, расстоянием между ними по фронту и глубине группы. Для адекватного численного моделирования требуется проведение расчетов в трехмерной постановке, что сдерживается сложностью численных моделей, методик и требует высокой производительности вычислительной техники.

С целью хоть отчасти восполнить существующий на сегодняшний день пробел в исследовании множественного воздействия макроскопических ударников на однородные преграды нами была предпринята попытка получить экспериментальные данные по синхронному и асинхронному множественному воздействию макроскопических металлических ударников с характерными размерами 3–8 мм на преграды из различных сплавов алюминия при скоростях соударения от 250 до 1300 м/с.

Экспериментальные исследования

На начальной стадии исследований по воздействию множества макроскопических ударников на преграды, применялся способ разгона группы стальных сферических ударников расширяющимися в вакуумированный канал ударной трубы продуктами взрыва заряда ВВ. Внешний вид устройства и блока с 25 сферическими стальными ударниками – шариками диаметром $d = 5$ мм, который размещался внутри ударной трубы, показан на рисунке. Схема проведения экспериментов позволяла осуществлять

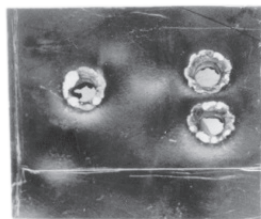


Специализированное устройство (ударная труба) в сборе перед опытом

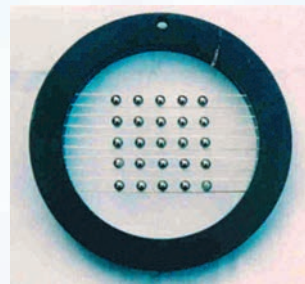
регистрацию положения ударников в потоке продуктов взрыва внутри диффузора с помощью импульсной рентгеновской установки (ИРУ).

В качестве преград в опытах использовались пластины из алюминиевого сплава Д16Т

толщиной 15 мм и толстые «полубесконечные» преграды из сплава алюминия Д16 диаметром $D_m = 120$ мм и толщиной $H = 100$ мм. Средняя скорость соударений лидирующей компактной группы сферических ударников из стали марки ПХ15 диаметром 5 мм с дюралюминиевыми преградами составила $\langle V \rangle = 1200\text{--}1400$ м/с.



Фотография фрагмента пластины. Сквозное пробивание пластины группой лидирующих шариков

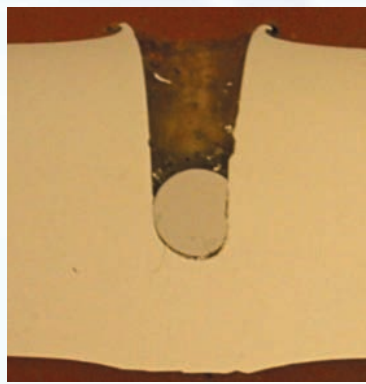


Блок с ударниками

При этих условиях множественного удара стальных шариков по дюралюминиевой преграде толщиной 15 мм происходило их сквозное пробитие несколькими ударниками. Одиноч-



а



б

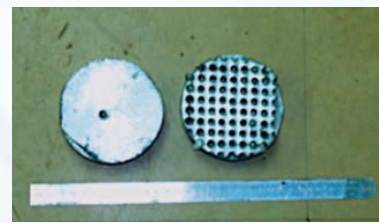
Сечение одного из кратеров с шариком после множественного удара лидирующей группы со скоростью 1300 м/с (а). Сечение кратера с шариком после одиночного удара со скоростью 1300 м/с (б)

ный ударник при аналогичной скорости соударения мишень не пробивал.

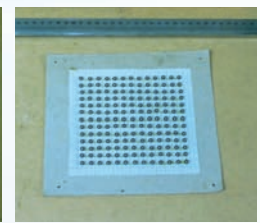
При соударении же множества стальных шариков с толстыми («полубесконечными») преградами, происходило проникание ударников на относительные глубины $z_{\text{мн}}/d = 2,8-4,1$ (где z – глубина проникания, d – диаметр ударника), что в среднем в 1,6 раз превышало глубину проникания $z_{\text{од}}/d = 2,2$ при одиночном ударе.

Невозможность создания в такой постановке экспериментов однородного в пространстве потока ударников и, соответственно, их управляемого синхронного соударения с преградой значительно усложняет численное моделирование данных экспериментов. Для устранения этого недостатка были разработаны схемы проведения экспериментов с применением взрывных ударных стенов (ВУС) типа «Ствол», используемых в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ.

В этой постановке преграда разгонялась продуктами взрыва бризантного ВВ и, пролетая сквозь мишенную камеру, соударялась с блоком с ударниками, а затем тормозилась в уловителе. Ударники располагались в виде сетки с шагом расположения $a = 2d$, где d – диаметр



а



б

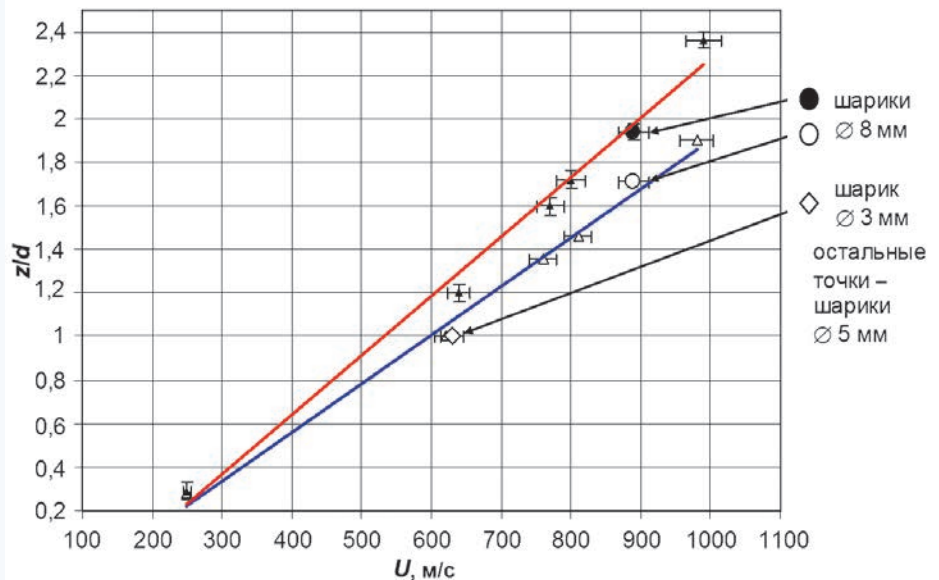
Характерный вид преград после одиночного и множественного воздействия (а) и блок со сферическими ударниками (б)

ударника (шарик или цилиндр). На рисунке показан внешний вид преграды после соударения с одиночным и множеством ударников и блок с ударниками.

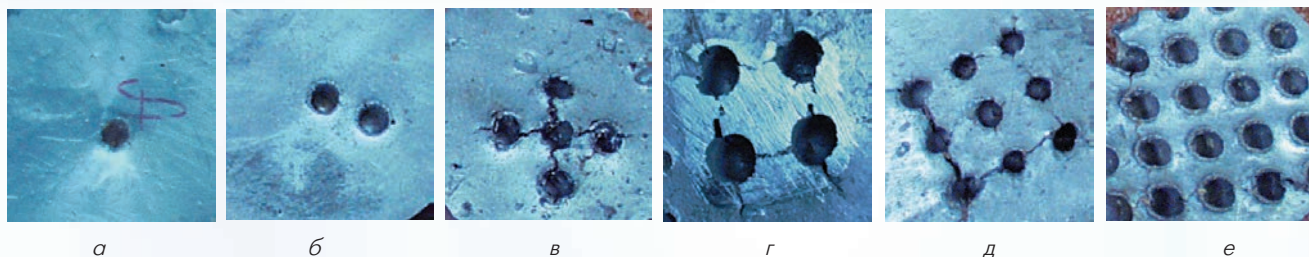
На рисунке в качестве примера показана зависимость относительной глубины проникания от скорости соударения для одного из сочетаний материалов ударника и преграды.

В проведенной серии экспериментов величина отношения средней относительной глубины проникания при множественном синхронном соударении к относительной глубине проникания одиночного ударника $\langle z_{\text{мн}} \rangle / z_{\text{од}}$ находилась в пределах от 1,04 до 1,36 при скорости соударения от 250 м/с до 1250 м/с для различного сочетания материала ударников и преграды.

В дальнейшем авторами были проведены эксперименты по исследованию эффективности множественного воздействия в зависимости от шага расположения ударников и их количества. Было установлено: 1) увеличение шага



Зависимость относительной глубины проникания от скорости соударения для сочетания материалов ударника и преграды ШХ15/Д16: синяя сплошная линия – одиночный ударник; красная сплошная линия – множественное воздействие



Внешний вид центральных частей преград после соударения: а – одиночный ударник; б – два ударника; в – пять ударников; г – четыре ударника; д – девять ударников; е – множество ударников

расположения ударников приводит к уменьшению эффективности множественного воздействия и при шаге $\geq 3d$ эффект множественного воздействия исчезает при данных условиях нагружения; 2) при «сеточном» расположении ударников с шагом $a = 2d$ минимальное количество ударников, при котором достигается максимальная эффективность множественного воздействия, при данных условиях нагружения, составляет 9 шт.

Металлографические исследования

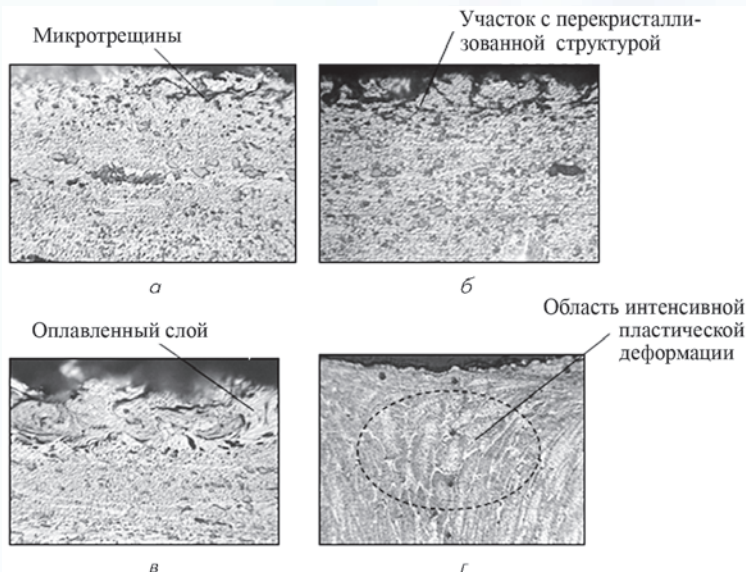
Для определения механизма разрушения преград важно иметь информацию о функции распределения параметров, характеризующих проникание ударников в преграды. Такую информацию получали с помощью металлографического анализа при исследовании сохраненных после опытов образцов «полубесконечных» преград.

Оказалось, что в диапазоне скоростей соударений от 250 до 1300 м/с как на стенках кратеров, так и под ними происходит заметное увеличение микротвердости материала на глубины до 2 мм, далее происходит постепенное уменьшение микротвердости до величины, характерной для основного, не подвергшегося нагрузке, материала. В случае соударений со скоростью 800 м/с и более в образцах преград на стенках кратера видны следы плавления и участки с перекристаллизованной структурой.

На стенках кратеров образуются микротрещины, идущие вглубь материала преград. В случае множественного воздействия они имеют выраженный характер и достигают длины до 100 мкм (при одиночном воздействии длина микротрещин до 40 мкм). Наличие зон плавления на стенках кратеров свидетельствует о возможности адсорбционной потери прочности материала на гра-

нице твердой и жидкой фаз. При наличии растягивающих напряжений, создаваемых соседними ударниками при множественном воздействии, это приводит к более выраженному образованию микротрещин и к более глубокому прониканию ударников в преграду, чем при одиночном воздействии.

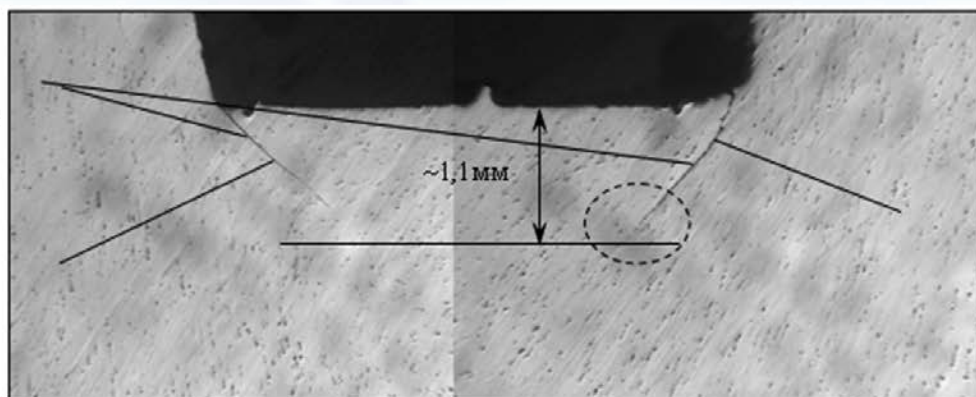
Результаты постопытного электронно-микроскопического анализа образцов мишеней после одиночного и множественного соударения со скоростью 1250–1300 м/с свидетельствуют о том, что при множественном воздействии ударников из вольфрама и стали на преграды из алюминиевых сплавов АМг6 и Д16 микроструктура материала претерпевает значительные изменения. В слоях, непосредственно прилегающих к стенкам кратеров в обоих сплавах, и на дне кратеров в образцах из Д16 произошла первичная рекристаллизация. Зафиксированные по границам зерен в пористых слоях выделения



Микроструктура образца преграды, увеличение $\times 1000$. Скорость соударения 800 м/с: а, б – боковые стенки кратера недалеко от поверхности воздействия; в – стенки кратера в донной части кратера; г – под донной частью кратера

Трещины
в полосах
сдвига

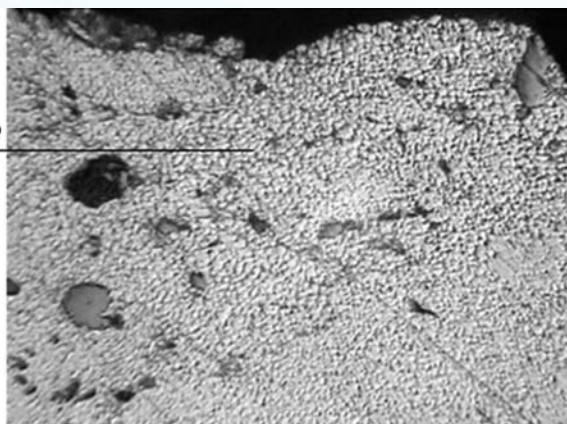
Длина
трещины
~1,3 мм



Длина
трещины
~1,68 мм

Микроструктура преграды в донной части кратера (увеличение $\times 25$), скорость соударения 1250 м/с

Рекристаллизованные
зерна α -твердого
раствора на основе
алюминия



Микроструктура образца в донной части кратера, увеличение $\times 1000$, скорость соударения 1250 м/с

тяжелых элементов свидетельствуют в пользу правомерности предположения о том, что наличие нерастворимых примесей в металле с высокой энергией дефектов упаковки затормаживает протекание процесса динамического возврата и тем самым способствует развитию динамической рекристаллизации.

Заключение

В результате проведенных экспериментов установлено, что при асинхронном и синхронном множественных воздействиях стальных ударников на преграды из алюминиевых сплавов происходит увеличение средней относительной глубины проникания ударников до 60 % по сравнению с глубиной проникания одиночного ударника при скоростях соударения до $V = 1300$ м/с. При «сеточном» расположении стальных ударников с шагом сетки $a = 2d$, для достижения наибольшей эффективности множественного воздействия (глубины проникания ударников) необходимо, чтобы их количество было не менее 9 шт. Увеличение шага сетки

более $a \geq 3d$ приводило к тому, что эффект множественного воздействия не наблюдался. Объяснение полученных результатов лежит в локальном разупрочнении материала преграды за счет растягивающих напряжений, возникающих в результате интерференции волн сжатия-разгрузки, создаваемых соседними ударниками, что приводит к более глубокому прониканию ударников в случае множественного воздействия.

Авторы выражают благодарность всем сотрудникам лаборатории 0340-06 ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ и лично бывшему начальнику лаборатории, в настоящее время советнику директору ИФВ, Владимиру Николаевичу Хворостину, заместителю научного руководителя РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктору технических наук Анатолию Леонидовичу Михайлову за поддержку данного направления исследований и приглашают заинтересованных ученых к взаимовыгодному сотрудничеству, будь то эксперименты или численное моделирование.

ТАНАКОВ Захар Валерьевич –

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник ИФВ

ЛИН Эмиль Эдипович –

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ИФВ