

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ ФИГУР АЛЬТШУЛЕРА

Б. В. ЛИТВИНОВ, В. И. ЗЕЛЬДОВИЧ, И. В. ХОМСКАЯ, А. Э. ХЕЙФЕЦ, Н. Ю. ФРОЛОВА

В Институте физики металлов УрО РАН, начиная с 1992 г., проводятся систематические исследования макро- и микроstructures металлических материалов, подвергнутых действию сходящихся ударных волн. Эксперименты по взрывному нагружению сталей, сплавов на основе меди и алюминия выполнялись под общим руководством академика Б. В. Литвинова коллективом сотрудников РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забахина: Н. П. Пурыгиным, А. К. Музырей, М. А. Лебедевым, В. И. Бузановым.

Расскажем о результатах исследования металлических шаровых образцов, подвергнутых взрывному нагружению сходящимися ударными волнами. Такие эксперименты позволяют изучать воздействие высоких давлений на макроскопический (до десятков см³) объем материала в пределах одного образца, то есть открывают возможность исследовать большие объемы вещества в экстремальных условиях, вплоть до моделирования геофизических и астрофизических процессов. Использование относительно небольшого числа точек инициирования позволяет существенно упростить постановку экспериментов по сравнению с опытами по сферическому взрывному нагружению.

Нагружение выполнялось путем подрыва сферического слоя ВВ, окружающего образцы диаметром 40–80 мм, в ограниченном числе (от 4-х до 12-ти) точек инициирования. При использовании мощного ВВ для предотвращения разрушения образцов нагружаемый шар вместе с зарядом ВВ помещался в массивный металлический корпус, замедляющий процесс разгрузки. В отдельных экспериментах корпус не использовался. Взаимодействие ударных волн, движущихся от различных точек инициирования, в зависимости от величины угла столкновения, определяемого параметрами нагружения, носило регулярный либо маховский характер.

После нагружения образцы разрезались по диаметральной плоскости для проведения металлографических исследований. Поверхность разреза подвергалась полировке и химическому травлению. Травление выявляло сложные узоры, отражающие реакцию материала на ударно-волновое воздействие. Мы назвали эти узоры фигурами Альтшулера, поскольку такие фи-

гуры впервые были описаны Л. В. Альтшулером при исследовании цилиндрического образца, нагруженного из шести точек инициирования (рис. 1; рисунок взят из статьи Л. В. Альтшулера. УФН. 1965. Т. 85. Вып. 2.).

Наличие фигур Альтшулера обусловлено вызванными ударно-волновым воздействием, микроструктурными изменениями различной природы (фазовые превращения, рекристаллизация, изменение плотности дислокаций и т. п.), приводящими к изменению травимости материала. Фигуры Альтшулера связывают микро- и макроуровни остаточных изменений в микроструктуре материала с макроскопическим описанием ударно-волнового движения. В сложных экспериментах, в которых ударно-волновое движение носит трехмерный характер и не поддается прямому расчету, эта связь между микро- и макроуровнями может быть использована для воссоздания картины распространения ударных волн и расчета параметров воздействия. Пример использования фигур Альтшулера при анализе эксперимента по додекаэдрическому нагружению стального шара $\varnothing 60$ (сталь Ст3) приведен на рис. 2.

Фигуры Альтшулера, вытравленные на диаметральной сечении, обусловлены протеканием в областях светлого (матового) травления цикла $\alpha \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha$ превращений. В левой части, приведенной на рисунке микроструктуры (относящейся к светлотравящейся области Альтшулера), хорошо видны характерные для стали следы образования ε -фазы; в правой части такие следы отсутствуют. Поскольку величина давления $\alpha \rightarrow \varepsilon$ перехода в стали известна, форма фигур Альтшулера может быть использована в качестве дополнительных граничных условий, существенно упрощающих расчет давлений в образце. Фигуры Альтшулера и вычисленная по ним «карта» давлений в наиболее симметричном для данного образца сечении (перпендикулярном

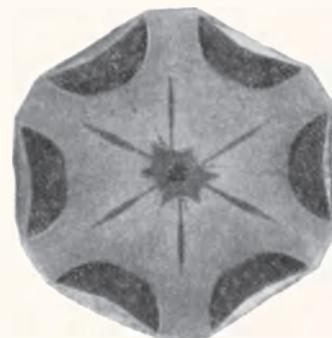


Рис. 1. Фигуры Альтшулера

радиусу шара в направлении на одну из 12 точек иницирования) приведены в нижней части рис. 2. Этот эксперимент был наиболее сложным, поскольку в нем имело место только регулярное взаимодействие ударных волн. Вследствие этого движение оставалось трехмерным.

В случае маховского взаимодействия форма фронта трансформируется. На рис. 3 приведены диаметральные сечения стальных образцов (диаметром 80 и 40 мм), нагруженных по квазикубической и квазидодекаэдрической схемам, соответственно. В нижней части рисунка приведены схемы трансформации ударно-волнового фронта для каждого из образцов. Возникновение маховских волн в «вершинах» квазикуба привело к преобразованию квазикубического фронта в октаэдрический. Об этом свидетельствует сформировавшаяся в образце октаэдрическая полость, унаследовавшая симметрию породившей ее ударной волны. Аналогичные процессы маховского отражения соседних ударных волн при большем числе точек иницирования (додекаэдр) приводят к качественно иному результату – преобразованию трехмерного движения в квазиодномерное (центросимметричное).

Фигуры, вытравленные на диаметральном сечении квазидодекаэдра, позволяют проследить процесс этого преобразования во времени

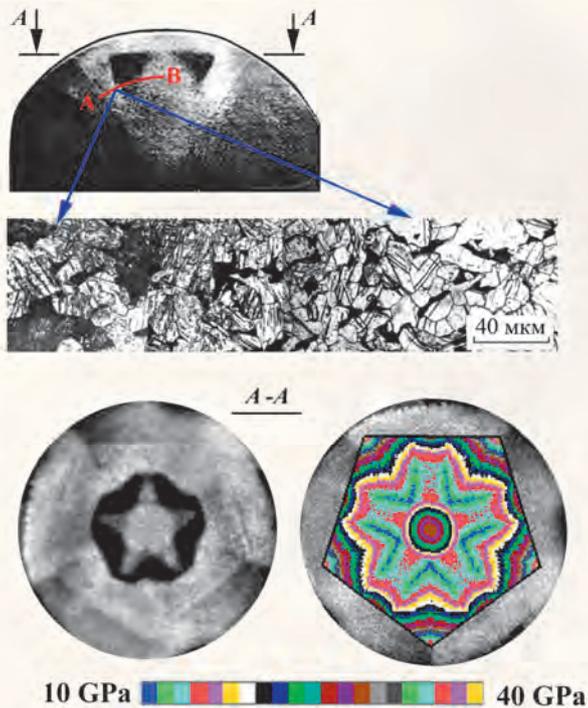


Рис. 2. Додекаэдрическое нагружение шара из стали Ст3 $\varnothing 60$ мм (регулярное взаимодействие). Фигуры Альтшулера, микротвердость, микроструктура и «карта» давлений

и воссоздать картину ударно-волнового движения. Фигуры Альтшулера имеют форму «звезды» (см. рис. 3), углы которой очерчены границами контактного разрыва, возникающими при движении маховских конфигураций. Маховские волны OO' (см. схему) имеют более высокую скорость по сравнению с первичными волнами AO и $O'A'$, поэтому происходит сглаживание фронта и преобразование его в квазиодномерный, о чем свидетельствуют кольцевые (сферически симметричные) фигуры Альтшулера в центральной части «звезды».

Кольцевые зоны измененной микроструктуры вблизи центра фокусировки связаны с радиальным повышением давления и присутствуют во всех опытах, где имела место кумуляция. На рис. 4 показаны кольцевые зоны в стальном, латунном и дюралюминиевом образцах (первые два шара $\varnothing 40$ мм нагружены с использованием 12 точек иницирования, третий – $\varnothing 60$ мм, 4 точки иницирования).

Во всех случаях ближайшая к центральной полости зона имеет дендритную структуру, указывающую на плавление и последующую кристаллизацию. Области плавления и соответствующие им микроструктуры показаны на рис. 4 малиновым цветом; остаточная (после разгрузки) температура в этих областях превышала температуру плавления. Микроструктурные изменения в следующей за зоной плавления кольцевой области (эти области и соответствующие им микроструктуры показаны на рис. 4 голубым цветом) зависят от материала и во всех слу-

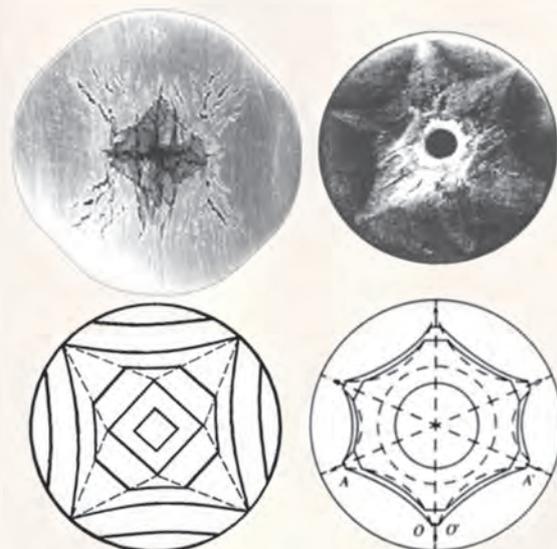


Рис. 3. Квазикубическое и квазидодекаэдрическое нагружение стальных образцов (маховское взаимодействие). Фигуры Альтшулера и эволюция ударно-волнового фронта

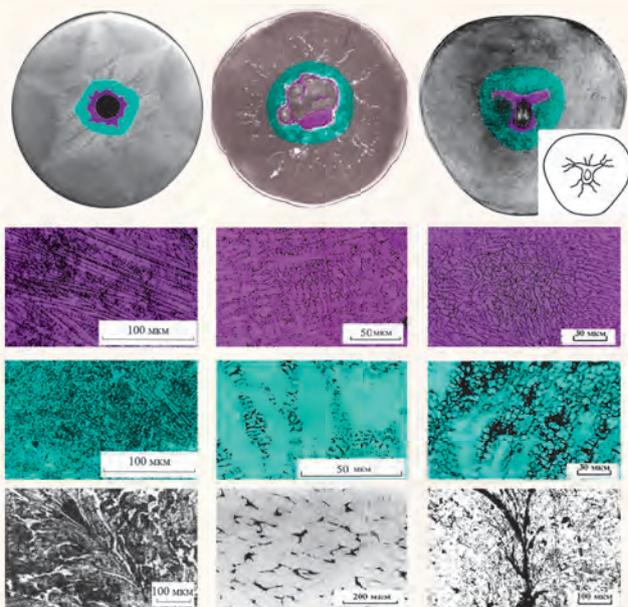


Рис. 4. Кольцевые зоны измененной микроструктуры при кумуляции в стальном (40Х), латунном (Л63) и дюралюминиевом (Д16) образцах

чаях свидетельствуют о повышенной остаточной температуре. В стали наблюдается игольчатая структура, указывающая на протекание бейнитного превращения (это означает, что остаточная температура превышала температуру $\alpha \rightarrow \gamma$ перехода), в латуни формируется дисперсная ($\alpha + \beta$)-структура, в дюралюминии наблюдается частичная рекристаллизация α -фазы. За пределами «голубой» зоны материал, как правило, сохраняет исходную структуру со следами локализованной деформации (рис. 4).

Термодинамические условия плавления и возникновения фаз высокого давления при ударно-волновом нагружении для многих материалов известны. Поэтому в тех случаях, когда движение в образцах становится одномерным, и давление начинает нарастать по степенному закону, характерному для сферической кумуляции, внешние границы кольцевых зон Альтшулера можно использовать в качестве реперных точек, позволяющих вычислить давление вблизи центра фокусировки. В трехмерной области, анализируя форму фигур Альтшулера, как уже было отмечено, тоже можно получить дополнительную информацию о протекании ударно-волновых процессов. В результате, сложную картину распределения давлений в образце удастся практически полностью воссоздать. Пример такого воссоздания для описанного выше стального шара $\varnothing 40$ мм приведен на рис. 5.

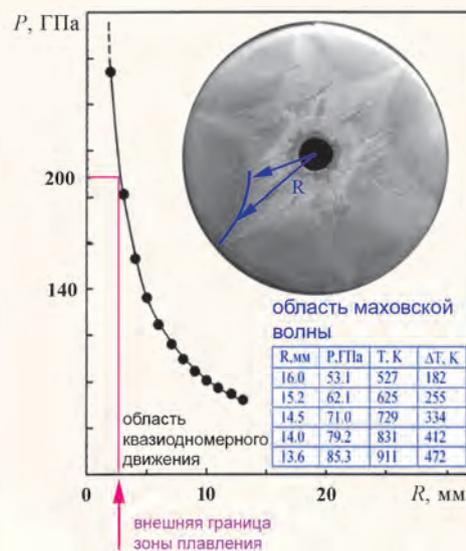


Рис. 5. Параметры нагружения, вычисленные на основе металлографического исследования и анализа форм фигур Альтшулера в стальном образце, нагруженном с использованием 12 точек инициирования (маховское взаимодействие)

Радиальная зависимость давления в центральной части образца проходит через две реперные точки: $P = 200$ ГПа (внешняя граница зоны плавления) и $P = 140$ ГПа (внешняя граница зоны $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения). Для трехмерной области образца приведены следующие параметры нагружения: давление и температура за фронтом маховской волны и скачок температуры на границе контактного разрыва, рассчитанные по форме границ контактного разрыва – углов «звезды».

Таким образом, металлографическое исследование нагруженных образцов и анализ фигур Альтшулера позволяют связать наблюдаемые микроструктурные изменения с макроскопическими параметрами ударно-волнового воздействия.

ЛИТВИНОВ Борис Васильевич – заместитель научного руководителя РФЯЦ-ВНИИТФ (1997–2010 гг.), академик РАН, лауреат Ленинской премии

ЗЕЛЬДОВИЧ Виталий Ильич – главный научный сотрудник ИФМ УрО РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор

ХОМСКАЯ Ирина Вячеславовна – старший научный сотрудник ИФМ УрО РАН, кандидат физ.-мат. наук

ХЕЙФЕЦ Алексей Эдуардович – старший научный сотрудник ИФМ УрО РАН, кандидат физ.-мат. наук

ФРОЛОВА Наталья Юрьевна – старший научный сотрудник ИФМ УрО РАН