

УДК 534.222.2

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЫ СЛОЕВ ИЗ СТАЛИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОСОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

О. Б. Дреннов, А. Л. Михайлов, П. Н. Низовцев, В. А. Раевский

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607190 Саров

Приведены результаты экспериментов, в которых наблюдалось развитие неустойчивости на контактной границе двух плотно соприкасающихся одинаковых металлов при прохождении через нее косою ударной волны. Проведено численное моделирование результатов экспериментов по двумерной лагранжевой методике. Использовалась упруго-пластическая модель с функциональной зависимостью динамического предела текучести от параметров состояния вещества. Расчетами показано, что возмущения развиваются при наличии между образцами технологического микрозора размером несколько десятков микрон. Разгрузка вещества за фронтом косою ударной волны в зазор вызывает значительный кратковременный градиент скорости. Одновременно за фронтом волны вблизи контактной границы происходит кратковременная потеря веществом прочности, вызванная термическим разупрочнением и гетерогенным характером деформирования.

Ключевые слова: неустойчивость, контактная граница, косая ударная волна, прочность.

Введение. Исследование гидродинамических неустойчивостей границ раздела веществ представляет большой теоретический и практический интерес. Неустойчивости границы раздела разнородных тел в условиях высокоскоростных течений известны давно и исследуются на основе классических задач механики сплошной среды. Эти исследования представляют интерес с точки зрения различных современных технических приложений, например при решении проблемы инерциального термоядерного синтеза. В частности, неустойчивость Кельвина — Гельмгольца (сдвиговая неустойчивость) возникает, когда в сплошной среде существует разрыв тангенциальной составляющей поля скоростей, и приводит к экспоненциальному росту возмущений на поверхности разрыва скорости [1].

Гидродинамические неустойчивости изучены достаточно полно для жидкостей и газов. Однако до сих пор отсутствуют модели, адекватно описывающие развитие неустойчивости в средах, обладающих прочностью, сжимаемостью, вязкостью, что прежде всего относится к металлам.

В работах [2–4] предприняты попытки численного моделирования развития неустойчивости на контактной границе металлов при высокоскоростном косом соударении, в том числе в сверхзвуковом режиме с присоединенными к точке соударения косыми ударными волнами [5].

Исследование развития возмущений на границе раздела двух металлических образцов при прохождении через нее ударной волны, фронт которой распространяется под углом к поверхности раздела (косая ударная волна), наиболее интересно в случае одинаковых

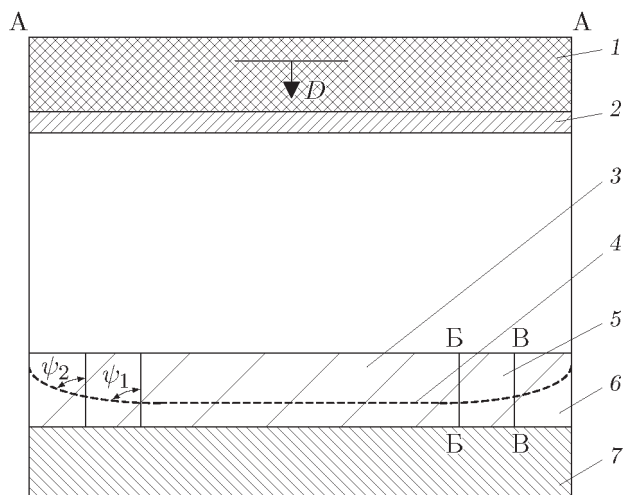


Рис. 1. Схема нагружения:

1 — заряд ВВ, 2 — ударник, 3 — диск, 4 — профиль ударной волны в образцах, 5 — кольцо, 6 — обойма, 7 — поддон

материалов. В случае различных материалов выполняются условия неустойчивостей Рихтмайера — Мешкова, Кельвина — Гельмгольца, а при соответствующем соотношении плотностей и неустойчивости Рэлея — Тейлора. При плотном прилегании (при отсутствии зазора) одинаковых металлов граница раздела должна быть устойчивой. Действительно, при пренебрежении сдвиговой прочностью такая граница является фиктивной, и после прохождения ударной волны не должны возникать особенности течения. В том случае, когда сдвиговой прочностью пренебречь нельзя, вдоль границы раздела слоев возможно проскальзывание одного слоя относительно другого.

Особым случаем проявления неустойчивости является обнаруженное в экспериментах развитие периодических возмущений на контактной границе образцов из одного и того же металла при пересечении ее косою ударной волной [6, 7].

Аналитическое исследование процесса показывает, что при плотном прилегании металлов скачок скорости на границе отсутствует и роста возмущений не происходит. Тем не менее в экспериментах зарегистрирован рост возмущений на границе металлов, возможной причиной которого является наличие микрозазора между реальными поверхностями.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов, в которых зарегистрировано развитие возмущений на контактной границе предварительно плотно прижатых образцов из стали при ее нагружении косою ударной волной. Приведены также результаты численного моделирования указанного процесса, которые позволили описать потерю устойчивости границы раздела твердых тел.

Постановка опытов. Результаты экспериментов. Схема нагружения приведена на рис. 1. Диск из стали марки ст.3 (диаметр 64 мм, толщина 14 мм) помещался в кольцо (внутренний диаметр 64 мм, внешний диаметр 90 мм, толщина 14 мм), которое, в свою очередь, помещалось в обойму (внутренний диаметр 90 мм, внешний диаметр 120 мм, толщина 14 мм). Диск, кольцо и обойма устанавливались на поддон (диаметр 120 мм, толщина 20 мм). Обойма и поддон предназначены для сохранения диска и кольца от разрушающего воздействия боковой и тыльной волн разрежения. Все перечисленные детали экспериментальной установки выполнены из стали марки ст.3.

Нагружение образцов осуществлялось летящим ударником из латуни диаметром 120 мм и толщиной 2 ÷ 3 мм (в разных опытах использовались ударники различной толщины), который разгонялся продуктами взрыва при детонации заряда взрывчатого вещества (ВВ) типа ТГ 50/50 диаметром 120 мм и толщиной 20 ÷ 40 мм (в разных опытах использовались заряды различной толщины). В зарядах ВВ одновременно по всей внешней поверхности (сечение А-А на рис. 1) генерировалась плоская детонационная волна. Соглас-

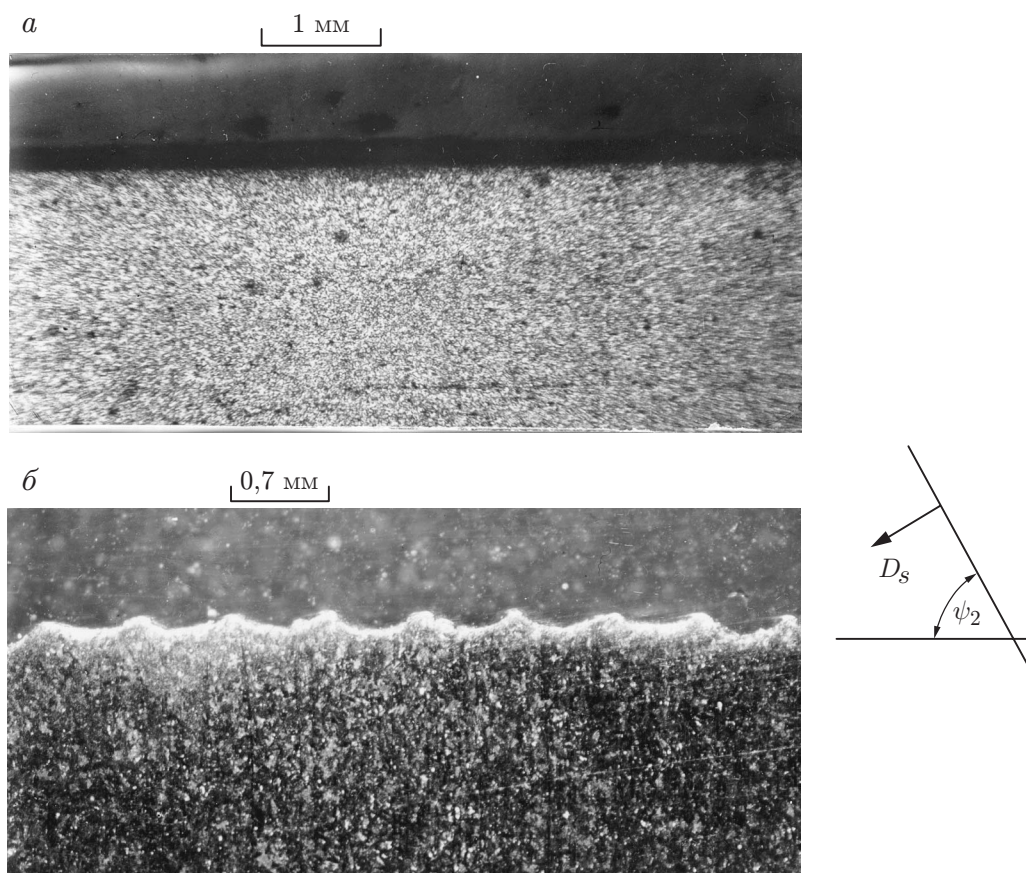


Рис. 2. Фотографии микрошлифов контактной границы кольцо — обойма, $\times 20$:
 а — исходная контактная граница кольца (ровная поверхность); б — контактная граница кольца после нагружения

но оценкам с использованием $(P-u)$ -диаграмм и одномерных газодинамических расчетов на входе в образцы обеспечивалось давление ударно-волнового импульса $P = 40 \div 55$ ГПа. С учетом затухания импульса на выходе из образцов давление составляло $P = 36 \div 49$ ГПа.

При давлении нагружения $P \approx 13$ ГПа для стали марки ст.3 необходим учет влияния фазового перехода и наличия “ударной” волны разгрузки. Выбранный диапазон давления при ударно-волновом нагружении позволяет проводить эксперименты с материалом в стабильном состоянии. Процесс развития возмущений является кратковременным (несколько микросекунд) и завершается до наступления обратного фазового перехода. Поэтому аномальное поведение стали марки ст.3, которое проявляется при $P \approx 13$ ГПа, можно не учитывать.

Из-за воздействия боковой волны разрежения ударник в полете приобретает изогнутую форму (края отстают от центральной зоны). Фронт ударной волны изображен на рис. 1 штриховой линией. Таким образом, контактные границы исследуемых образцов (сечения Б–Б, В–В) нагружаются косой ударной волной.

Во всех проведенных опытах зафиксировано развитие возмущений на контактных границах диск — кольцо (сечение Б–Б) и кольцо — обойма (сечение В–В). На рис. 2 приведены фотографии микрошлифов контактной границы кольцо — обойма (D_s — скорость фронта ударной волны в металле; ψ_2 — угол наклона фронта к границе раздела кольцо — обойма).

Волнообразные возмущения, близкие по форме к синусоидальным, имеют амплитуду $a \approx 0,06$ мм и длину волны $\lambda \approx 0,7$ мм. Наблюдается интенсивное изменение исходной структуры стали в приграничной зоне шириной $\Delta \approx 0,02$ мм.