

СХОЖДЕНИЕ МЕДНЫХ И СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ВЗРЫВНОМ КОЛЬЦЕВОМ НАГРУЖЕНИИ

*С. В. Балушкин¹, В. И. Зельдович², И. В. Хомская², Е. В. Шорохов¹,
Д. Н. Абдуллина², А. Е. Тимонина²*

¹ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Выполнены эксперименты по взрывному нагружению цилиндрических оболочек из меди М1 диаметром 60 мм и толщиной стенки 8 мм и из стали 12Х18Н10Т размерами 57 мм и 7,5 мм, соответственно. Оболочки были окружены слоем ВВ. Инициирование ВВ выполняли из 8 точек, равномерно расположенных по кольцу. Поперечные сечения нагруженных медных оболочек при неполном и полном сжатии представлены на рис. 1.

При неполном сжатии зафиксировано образование выбросов (рис. 1, а). Выбросы представляют собой пластические (кумулятивные) струи, которые являются следствием действия маховских волн, возникающих при соударении ударных волн, движущихся от соседних точек инициирования [1, 2]. Сжатие оболочки происходит путем расширения и смыкания выбросов в центре оболочки (рис. 1, б). Так как материал оболочки характеризуется свойствами вязкой жидкости (текучестью и сплошностью), назовем механизм сжатия гидродинамическим.

Поперечные сечения нагруженных стальных оболочек при неполном и полном сжатии представлены на рис. 2. При неполном сжатии оболочка разделилась на 8 однотипных фрагментов (рис. 2, а). Разделение на фрагменты происходит по закрученной спирали, положение которой определяется деформацией сдвига и дополнительным сжатием перпендикулярно радиусу.

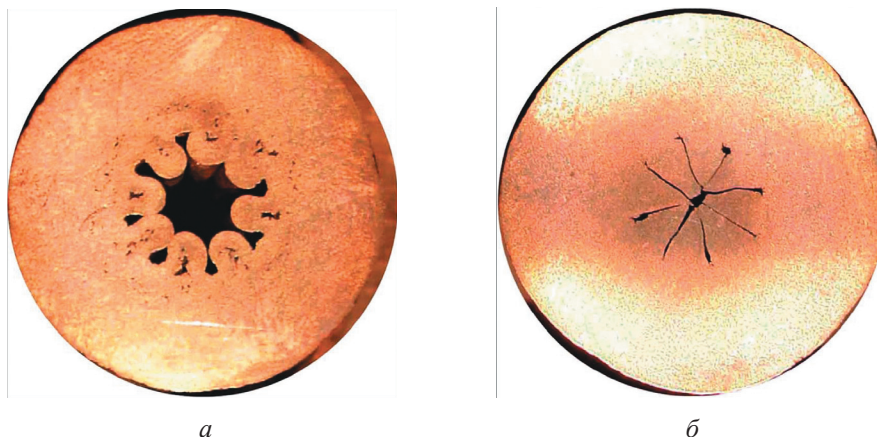


Рис. 1. Поперечные сечения сходящихся медных оболочек при неполном (а) и полном (б) сжатии

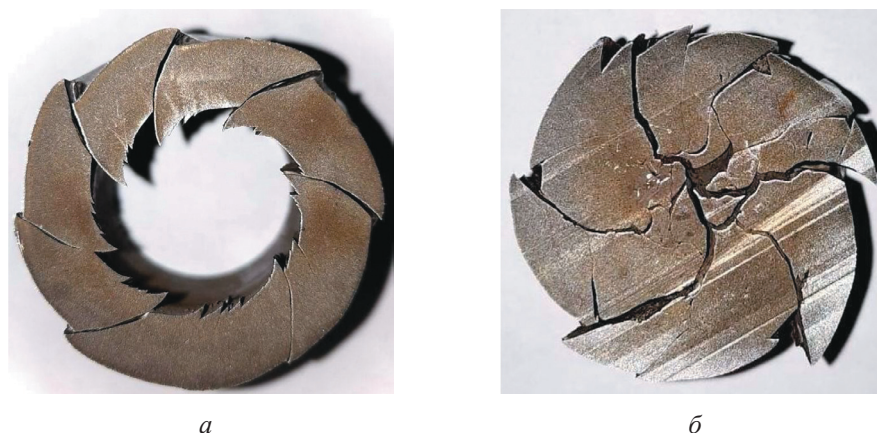


Рис. 2. Поперечные сечения сходящихся стальных оболочек при неполном (а) и полном (б) сжатии

Схождение происходит путем деформации фрагментов при их движении к центру оболочки (рис. 2, б). Деформация фрагментов осуществляется сдвигом и приводит к образованию зубцов на поверхностях оболочек. Назовем этот механизм схождения твердотельным, так как отсутствуют свойства вязкой жидкости (текучесть и сплошность). Важно, что высокоскоростная деформация фрагментов происходит с образованием полос сдвига.

Металлографические исследования показали существенную разницу в структурообразовании при сжатии оболочек по разным механизмам. В сжатой медной оболочке образовалось три зоны с различной микроструктурой [1, 2]. На рис. 3, а представлена микроструктура наружной кольцевой (основной) зоны. Структура однотипна, и состоит из чередующихся полос с разной степенью деформации (рис. 3, а). В сильно деформированных полосах преобладает деформация двойникованием, в слабо деформированных – скольжением. В средней кольцевой зоне деформация хаотична, что обусловлено залечиванием откольных пор. В центральной зоне отмечено образование новых рекристаллизованных зерен, что свидетельствует о локальном повышении температуры до ~500–600°C.

Структура стальных оболочек крайне неоднородна. В слабо деформированных участках сохраняются границы исходных зерен; в зернах образуются двойники и мартенсит деформации. В сильно деформированных участках возникают полосы сдвига (рис. 3, б); локализованное течение разрушает границы исходные зерен; откольные поры не залечиваются (рис. 3, б).

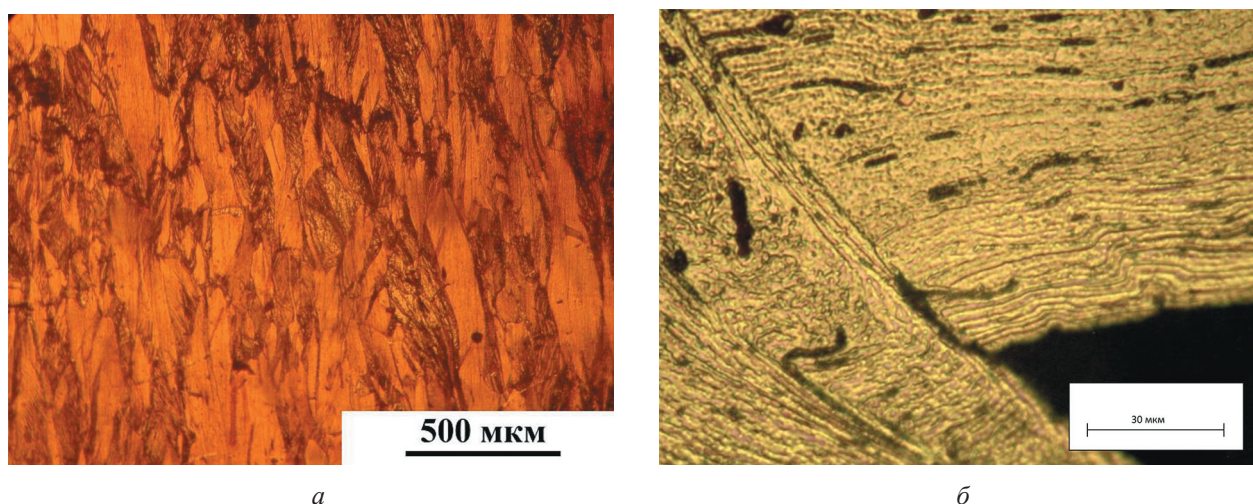


Рис. 3. Микроструктура медной (а) и стальной (б) оболочек:
а – полное схождение, б – неполное схождение

Таким образом, выполненные эксперименты по сжатию цилиндрических оболочек под действием взрыва, инициированного из восьми точек, показали, что сжатие может происходить по двум принципиально различным механизмам: гидродинамическому (для «мягких» оболочек) и твердотельному (для «жестких»).

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме «Структура» № 122021000033-2.

Литература

1. Зельдович, В. И. Металлографическое исследование высокоскоростной деформации и сжатия медных толстостенных цилиндрических оболочек при взрывном нагружении [Текст] / В. И. Зельдович, А. Э. Хейфец, С. В. Балускин, В. И. Беляков // Физика металлов и металловедение (ФММ). – 2023. – Т. 124, № 10. – С. 916–922.
2. Зельдович, В. И. Сжатие медных толстостенных цилиндрических оболочек под действием взрыва [Текст] / В. И. Зельдович, А. Э. Хейфец, И. В. Хомская и др. // Физика горения и взрыва (ФГВ). – 2025. – Т. 61, № 2.