

СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ДИФфуЗИЯ

УДК 669.3:621.7.044:620.186

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ И СХОЖДЕНИЯ МЕДНЫХ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2023 г. В. И. Зельдович^{а, *}, А. Э. Хейфец^а, С. В. Балускин^б, В. И. Беляков^б

^аИнститут физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620990 Россия

^бФГУП “РФЯЦ–ВНИИТФ” им. академ. Е.И. Забабахина, а/я 245, Снежинск, Челябинской обл., 456770 Россия

*e-mail: zeldovich@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 02.05.2023 г.

После доработки 25.07.2023 г.

Принята к публикации 07.08.2023 г.

Металлографическим методом исследован процесс схождения медных толстостенных цилиндрических оболочек под действием взрыва. Взрыв инициировали из восьми точек, равномерно расположенных по окружности на поверхности взрывчатого вещества, окружающего оболочку. На промежуточной стадии схождения образовалось восемь выбросов на внутренней поверхности оболочки. Схождение оболочек в цилиндр завершается за счет расширения и смыкания выбросов. Образование выбросов объяснено возникновением пластических (кумулятивных) струй на фронте деформации. Струи возникают при столкновении соседних деформационных выступов. Обнаружены участки локализованной деформации внутри и вокруг выбросов, что связано с данным методом инициирования взрыва. Установлено, что высокоскоростная деформация меди при схождении оболочек сопровождается образованием большого количества двойников. В наружных зонах оболочек двойников больше, чем во внутренних.

Ключевые слова: схождение медных оболочек, взрывное нагружение, высокоскоростная деформация, металлография, макро- и микроструктура, потеря устойчивости при схождении, откольные явления

DOI: 10.31857/S0015323023600703, **EDN:** DMJGMO

ВВЕДЕНИЕ

Схождение цилиндрических оболочек под действием взрыва представляет собой один из случаев кумуляции энергии, при котором возможно неограниченное возрастание энергии вдоль оси оболочки [1]. Процесс схождения определяется как размерами оболочки и физико-механическими свойствами материала, так и способом взрывного нагружения. В различных вариантах нагружения варьируется интенсивность воздействия за счет характеристик и количества взрывчатого вещества (ВВ), изменяется способ инициирования взрыва. Возможно использование специальных приемов: окружение слоя ВВ корпусом, задерживающим разлет продуктов взрыва; применение прокладок между слоем ВВ и оболочкой для управления формой импульса. В повседневной жизни схождение оболочек (труб) под действием взрыва может быть использовано для экстренного перекрытия трубопроводов при транспортировке жидкостей или газов [2, 3].

В работах [4–6] был исследован процесс схождения медных оболочек разных размеров под действием скользящей детонации. Малая оболочка диаметром 24 мм и толщиной стенки 2 мм разделилась в результате откола на две кольцевые ча-

сти. Внутренняя часть комкалась при схождении под действием деформации изгиба [4]. Оболочки средних размеров диаметром 48 мм и толщиной стенки 4 мм при схождении деформировались сдвигом-сжатием [5]. При неполном схождении оболочки была обнаружена потеря устойчивости гладкого фронта деформации, которая проявляется в виде гидродинамических выбросов [4, 5]. Большая оболочка диаметром 118 мм и толщиной стенки 5.9 мм была подвергнута интенсивному нагружению (толщина слоя ВВ была 40 мм). В полученном при схождении цилиндре образовались три зоны: широкая зона деформации, зона рекристаллизации и небольшая центральная зона, в которой медь испытала плавление [6]. Исследованные оболочки будем считать тонкостенными, отношение их толщины к радиусу δ/R было 0.166 и менее [7]. Представляло научный и практический интерес изучение схождения толстостенных оболочек, у которых значение δ/R существенно превышает 0.166. Цель настоящей работы состояла в исследовании особенностей процесса схождения и высокоскоростной деформации медных цилиндрических оболочек с большой толщиной стенки. При взрывном нагружении был использован спо-

Таблица 1. Размеры оболочек и характеристики взрывного нагружения

Номер оболочки	Диаметр/толщина оболочки до нагружения, мм	δ/R , δ толщина	Длина, мм	Толщина слоя ВВ, мм	Толщина корпуса, мм	Толщина прокладки, мм
1	60/8	0.266	250	2	20	5
2			300	3		

соб инициирования ВВ, отличающийся от скользящей детонации.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Цилиндрические толстостенные оболочки из меди М1 были подвергнуты взрывному нагружению. Размеры оболочек и детали нагружения представлены в табл. 1.

Средний участок оболочек был окружен слоем ВВ. Толщина слоя была разной для нагружаемых оболочек. Для задержки разлета продуктов взрыва и увеличения продолжительности действия ударного импульса, система была окружена корпусом из стали 10. Между поверхностью оболочек и слоем ВВ располагали прокладки из пенопласта, для сглаживания формы ударного импульса. Детонационная волна создавала на поверхности оболочек ударную волну, под действием которой происходило инерционное схождение оболочки к оси симметрии. В работах [4–7] схождение оболочек под действием скользящей детонации осуществляли с использованием кольцевой системы инициирования ВВ. Для такого способа инициирования требуется свободный доступ к торцу оболочки, что осложняет его применение. В настоящей работе инициирование накладного ВВ было выполнено из восьми точек, равномерно расположенных по окружности на цилиндрической поверхности оболочек. Этот способ более простой для практического применения.

На поперечных сечениях нагруженных оболочек были выполнены металлографические исследования. Наблюдения микроструктуры проводили на микроскопе ЕРІТУР 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Процесс взрывного нагружения оболочки можно разделить на два этапа, отличающихся по времени. Первый этап состоит в действии ударной волны на материал оболочки. При скорости ударной волны ~5 км/с и толщине стенки оболочки 8 мм он длится 1–2 мкс. Второй этап начинается одновременно с первым и состоит в инерционном сжатии оболочки. На этом этапе происходит высокоскоростная деформация, и при полном сжатии оболочка преобразуется в ци-

линдр. Длительность второго этапа на порядок больше, чем первого.

На рис. 1 представлен вид поперечных сечений нагруженных оболочек. Шлифы отполированы, но не протравлены. Оболочка № 1 испытала неполное схождение (рис. 1а). Внутренняя поверхность оболочки (фронт деформации) существенно отклоняется от окружности, то есть осесимметричная деформация при сжатии резко нарушена. При сжатии образовалось восемь выбросов по числу точек инициирования. Между выбросами остались пустоты, у основания выбросов толщина пустот увеличена. Выбросы имеют округлую форму и отличаются от выбросов, наблюдавшихся при сжатии оболочек среднего размера под действием скользящей детонации [4, 5]. Оболочка № 2 на нагруженном участке сошлась практически полностью (рис. 1б), и был получен цилиндр диаметром 40 мм. В центре цилиндра виден результат нарушения симметрии сжатия в виде восьми тонких пустот. Естественно считать, что при сравнении сжатия этих оболочек наблюдаются последовательные стадии развития одного процесса сжатия. Выбросы преобразовались в участки треугольной формы в оболочке № 2, которые сомкнулись в центре.

Вдоль окружности, расположенной на половине радиуса поперечного сечения оболочки № 1, видна система пор (рис. 1а). Поры имеют откольное происхождение, как и в ранее исследованных оболочках [4, 5]. В оболочке № 2 откольные поры отсутствуют, но это не значит, что их не было. Поры залечились при высокоскоростной деформации, как это наблюдалось в ранее изученных оболочках [4, 5].

Результаты расчета величины и скорости деформации при сжатии оболочки № 2 представлены в табл. 2. Время сжатия 30 мкс.

Таблица 2. Истинная деформация ϵ и скорость деформации для разных слоев оболочки № 2

Радиус слоя, мм	20	10	2	1
Истинная деформация	0.4	1.0	2.4	3.1
Скорость деформации, 10^4 с^{-1}	2.7	6.7	16.0	20.7

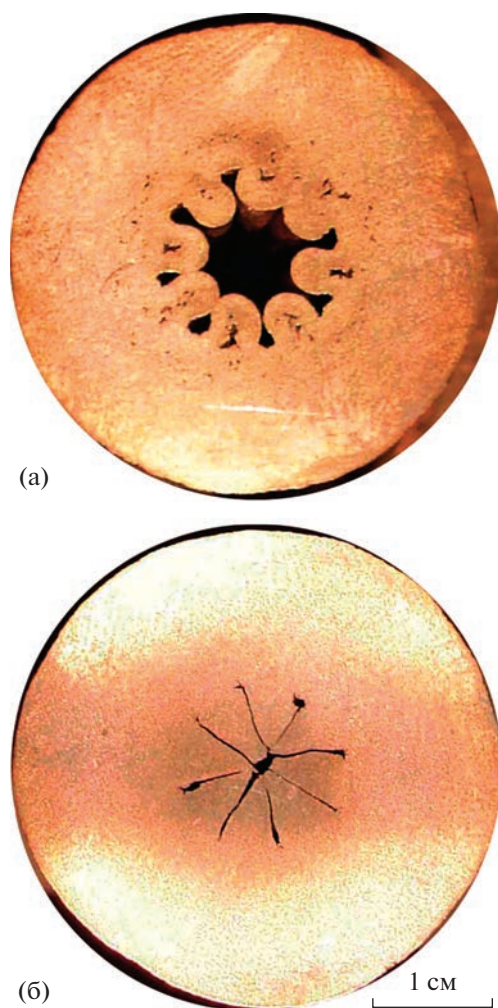


Рис. 1. Поперечные сечения оболочек № 1 (а) и № 2 (б).

Из-за нарушения симметрии схождения значения истинной деформации и скорости деформации для центральных слоев цилиндра являются усредненными. Из табл. 2 следует, что для слоев цилиндра, расположенных на радиусе 10 мм и глубже, скорость деформации достигает 10^5 с^{-1} .

На рис. 2а представлена макроструктура оболочки № 1 в поперечном сечении. Видно, что макроструктура состоит из двух кольцевых зон, разделенных окружностью, сформированной откольными порами. В наружной зоне отмечается образование большого количества двойников. На рис. 2б приведена микроструктура этой зоны с многочисленными тонкими двойниками. Толщина двойников составляет 5 мкм и менее. Двойники группируются в протяженные полосы. Полосы сильной деформации (с двойниками) чередуются с полосами слабой деформации. Между этими полосами можно провести границу вдоль границ зерен. По всей видимости, чередование полос отражает эффекты самоорганизации при высокоскоростной деформации на мезоуровне.

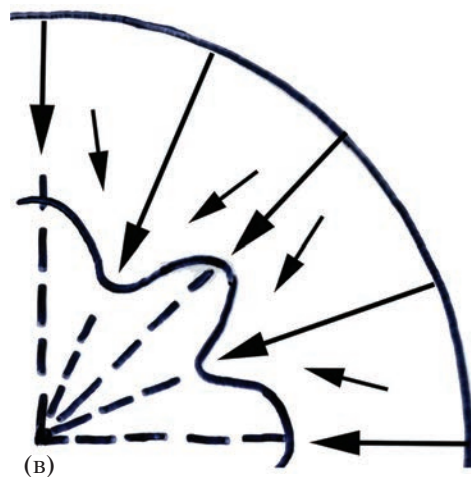
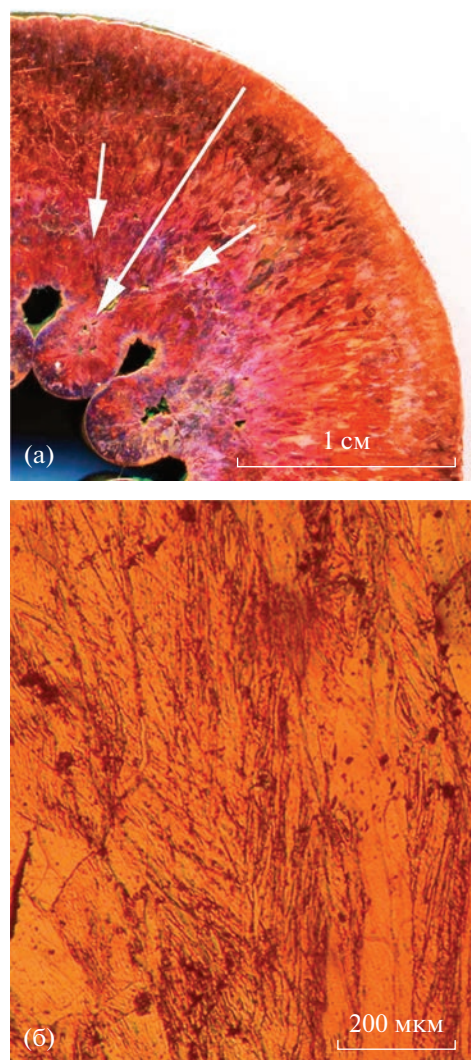


Рис. 2. Поперечное сечение оболочки № 1. Макроструктура (а), двойникование в наружной зоне (б) и схема изменения направления течения вещества (в).

Во внутренней зоне оболочки, включая выбросы, в структуре двойников меньше, чем в наружной зоне. Известно, что при квазистатической деформации медь деформируется скольжением. Но деформация при высокой скорости и/или при низкой температуре осуществляется преимущественно двойникованием. Двойникование меди в исследованных оболочках обусловлено высокой скоростью деформации, 10^4 – 10^5 с $^{-1}$. Однако в процессе схождения температура внутренней части оболочки повышается, и это приводит к изменению механизма высокоскоростной деформации. Вклад двойникования уменьшается, роль скольжения возрастает.

Макроструктура наружной зоны иллюстрирует радиальное течение вещества. Однако при большом увеличении видны периодические отклонения течения вещества от радиального направления, на ~ 20 град (указаны стрелками на рис. 2а). Такие отклонения связаны с необходимостью доставки вещества в выбросы. Схема течения поясняет, как возникают эти отклонения (рис. 2в).

На рис. 3а представлена макроструктура оболочки № 2 в поперечном сечении. Видны три зоны, отличающиеся по структуре.

В наружной кольцевой зоне микроструктура состоит из зерен с многочисленными двойниками (рис. 3б), как и в оболочке № 1. Течение вещества происходит в радиальном направлении, и зерна приобретают удлиненную форму. (В исходном состоянии зерна были равноосные и имели размер 200–300 мкм.) Зерна группируются в радиальные полосы. Как и в оболочке № 1, наблюдается чередование полос с сильной и слабой деформацией. В средней зоне, вплоть до треугольных участков, деформация не радиальная, а хаотическая (рис. 3в).

Из наших исследований схождения других оболочек [4, 5] следует, что хаотический характер деформации в этой зоне объясняется залечиванием откольных повреждений. Внутренняя зона почти полного схождения состоит из треугольных участков, сформировавшихся из выбросов.

Способ инициирования взрыва из восьми точек приводит к особенностям локализации деформации в отдельных участках оболочек. На рис. 4а приведена микроструктура треугольного участка оболочки № 2 со следами локализованной деформации. В центре участка видна область течения, в которой деформация резко возрастает. На рис. 4б представлена схема, поясняющая происхождение данной локализации деформации при образовании выброса в оболочке № 1 и дальнейшее течение в треугольном участке оболочки № 2.

Локализация деформации происходит также при заполнении промежутков (пустот) между выбросами. На рис. 5а видно, что в оболочке № 1 де-

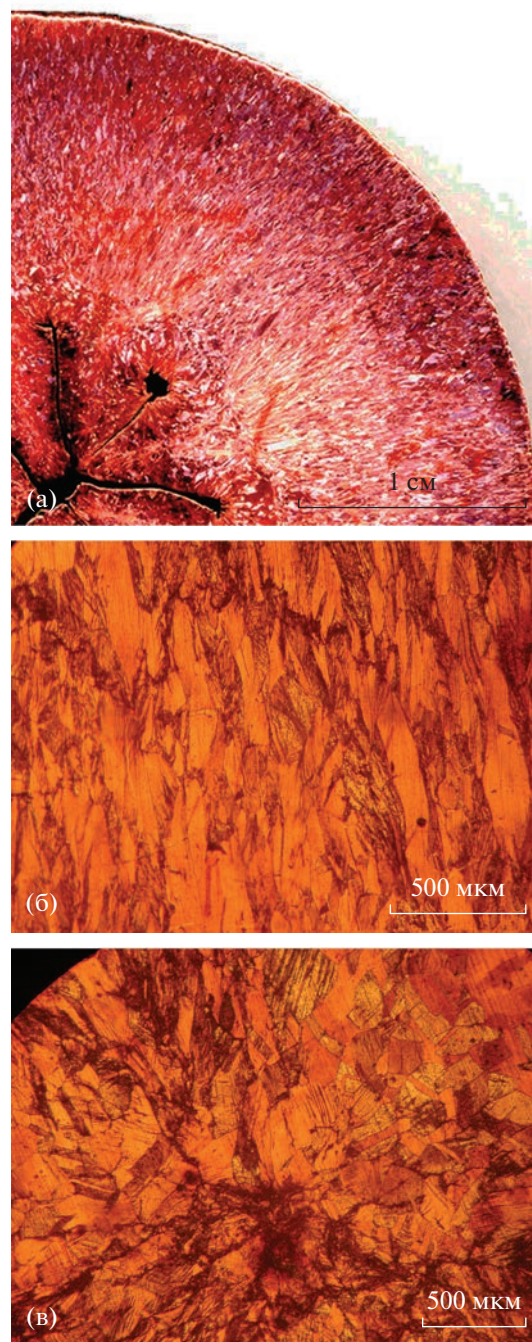


Рис. 3. Поперечное сечение оболочки № 2. Макроструктура (а), микроструктура наружной (б) и средней зоны (в).

формация локализуется вокруг острого угла промежутка (у основания выступов). В дальнейшем, два участка локализованной деформации вокруг углов сливаются в один в оболочке № 2 (рис. 5б). На рис. 5в показана схема течения вещества, участки локализованной деформации обведены штриховой линией.

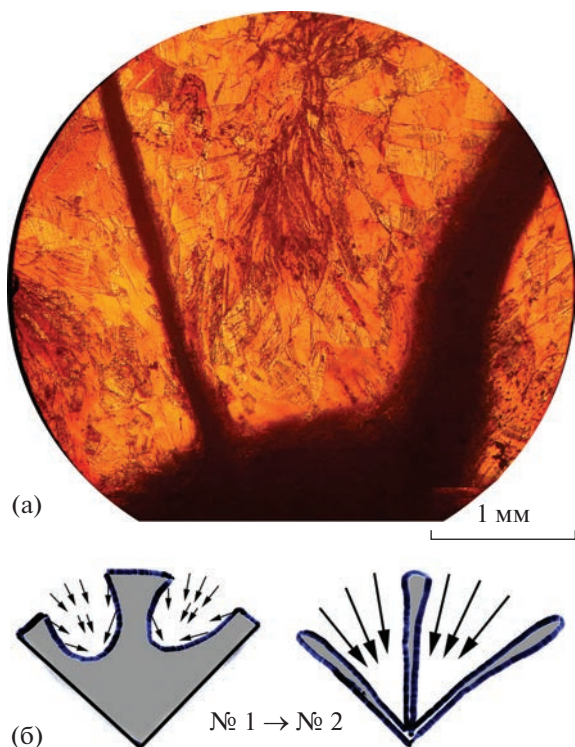


Рис. 4. Локализация деформации внутри треугольного участка оболочки № 2 (а) и схема образования локализации (б). Стрелками указаны направления течения вещества.

Необходимо отметить, что в выбросах иногда наблюдаются равноосные зерна. Это свидетельствует о локальном повышении температуры до температуры рекристаллизации, $\sim 500^\circ\text{C}$. В то же время, в микроструктуре не наблюдаются особенности, указывающие на прохождение кристаллизации. Значит, не было нагрева до температуры плавления меди, 1083°C .

СХЕМЫ СХОЖДЕНИЯ

Рассмотрим, как происходит процесс схождения исследованных оболочек. Главная особенность схождения состоит в образовании восьми выбросов, по числу точек инициирования ВВ. Будем считать, что фронт деформации при схождении состоит из восьми дугообразных участков, исходящих из точек инициирования. На рис. 6а представлена соответствующая схема схождения. Наружная поверхность исходной оболочки показана сплошной линией, внутренняя поверхность — штриховой. Большие дуги показывают фронт ударной волны в оболочке, малые дуги изображают последовательные положения внутренней поверхности оболочки при схождении, т.е. положение фронта деформации. Когда малые дуги сходятся в центре, схождение оболочки завершается.

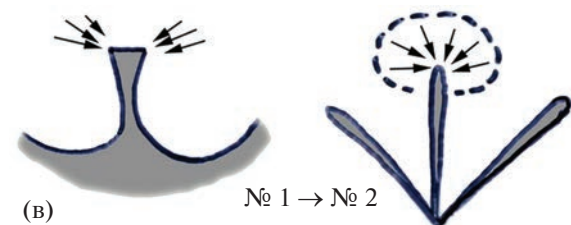
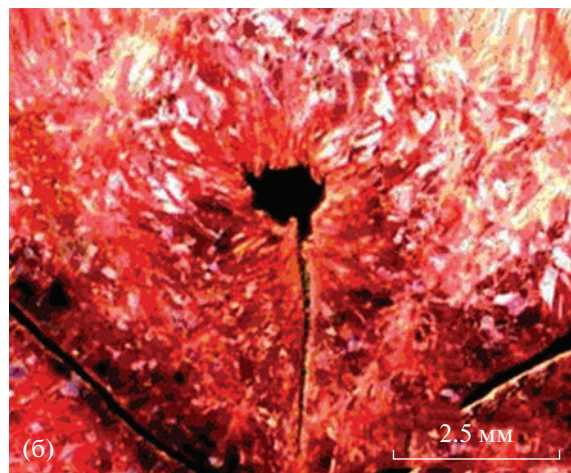
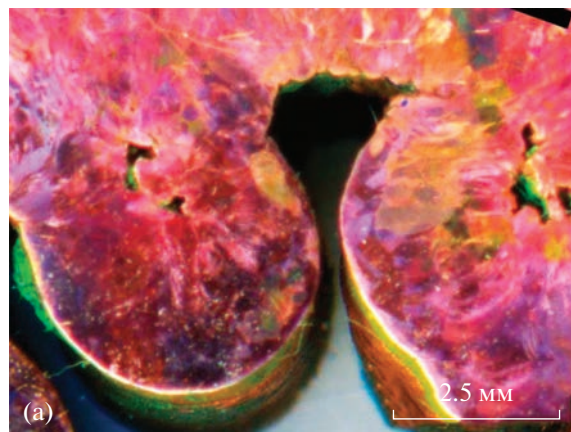


Рис. 5. Локализация деформации при заполнении промежутков между выбросами (а, б) и схема течения вещества (в). Стрелками указаны направления течения.

Такая схема схождения не соответствует реальности, так как не описывает образование выбросов.

Для объяснения образования выбросов используем термин “пластическая струя”. Он использован В.В. Рыбиным при исследовании структур, полученных при сварке взрывом [8]. По своему происхождению пластические струи по сути являются кумулятивными, возникающими при высокоскоростном соударении металлических пластин [1]. Можно предположить, что взаимодействие соседних дугообразных участков на фронте деформации при высокой скорости деформации приводит к образованию пластических (кумулятивных) струй, как показано на рис. 6б

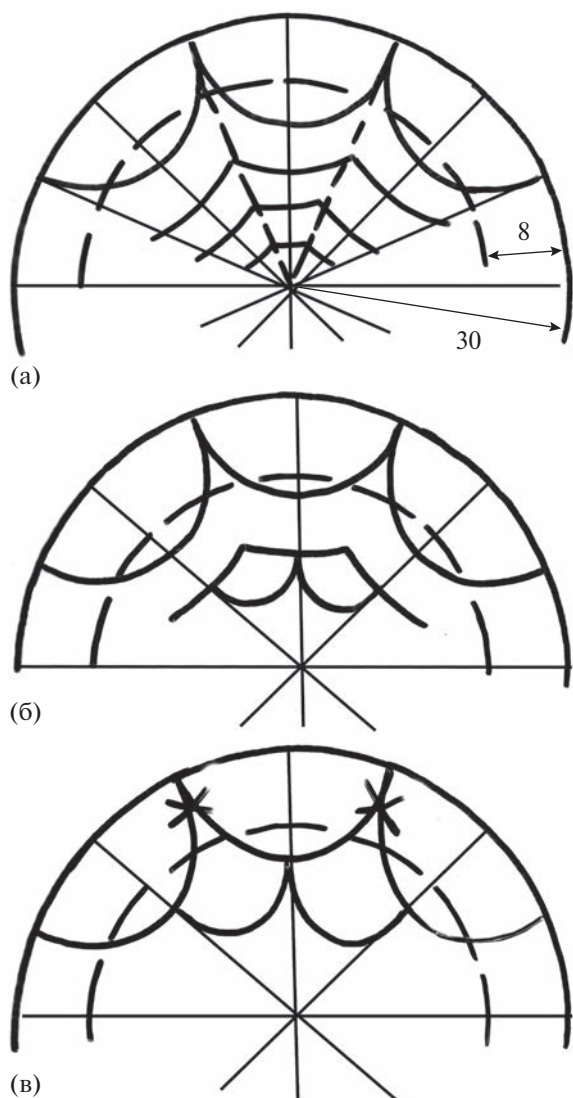


Рис. 6. Схемы возможного процесса схождения (пояснения в тексте) а — схема схождения при регулярном взаимодействии ударных волн, б — схема образования выбросов при схождении пластических струй, в — схема образования выбросов под действием маховской волны.

малыми дугами. В процессе схождения струи расширяются и преобразуются в выбросы. Схема на рис. 6б иллюстрирует это описание схождения. Важно, что по этой схеме выбросы возникают на некоторой промежуточной стадии схождения.

В приведенной на рис. 6а схеме схождения взаимодействия ударных волн, распространяющихся от соседних точек инициирования, регулярно. Однако большая толщина оболочек и геометрия расположения точек инициирования ВВ допускают возникновение маховских конфигураций (тришюков) [1, 9, 10]. Угол столкновения соседних ударных волн изменяется в широких пределах, и при углах 35° – 40° следует ожидать возникновение маховской волны [9, 10]. Давление в маховской волне увеличивается в несколько раз, и под ее действием формируется выброс. На рис. 6в представлена схема такого процесса. Места возникновения маховских волн отмечены крестиками. Эта схема схождения, как и предыдущая, объясняет образование выбросов. Важно отметить, что в данной схеме выбросы возникают в самом начале схождения.

Промежуточную стадию схождения оболочки № 2 можно наблюдать на внутренней поверхности оболочки. На участке неполного схождения видно восемь выбросов (рис. 7). Очевидно, что выбросы возникли на промежуточной стадии схождения, как и в оболочке № 1 (см. рис. 1). Отсюда следует, что из двух вариантов объяснения образования выбросов предпочтительным является вариант с пластическими (кумулятивными) струями (рис. 6б), которые возникают при столкновении соседних деформационных выступов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Медные толстостенные цилиндрические оболочки были подвергнуты действию взрыва, инициированного из восьми точек, равномерно расположенных по окружности на поверхности обо-

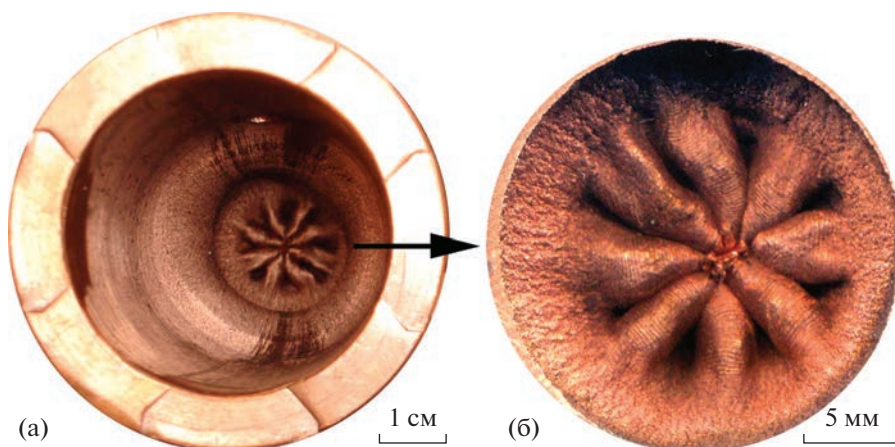


Рис. 7. Выбросы на внутренней поверхности оболочки № 2.

лочек. При неполном схождении на внутренней поверхности оболочки образовалось восемь выбросов, то есть произошла потеря устойчивости гладкого фронта деформации. Предложен механизм образования выбросов, основанный на возникновении пластических (кумулятивных) струй на фронте деформации. Струи возникают при столкновении соседних деформационных выступов. Образование и развитие выбросов является деформационным механизмом, посредством которого происходит схождение оболочки в цилиндр.

Установлено, что высокоскоростная деформация меди при схождении оболочек сопровождается образованием большого количества двойников. В наружных зонах оболочек двойников больше, чем во внутренних. Так как температура внутренней части оболочек повышается, изменяется механизм деформации: вклад двойникования уменьшается, вклад скольжения возрастает. Обнаружены участки локализованной деформации внутри и вокруг выбросов, что связано с данным методом инициирования взрыва.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме “Структура” Г. р. № 122021000033-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Забабахин Е.И., Забабахин И.Е. Явления неограниченной кумуляции. М.: Наука, 1988. 172 с.
2. Иванов А.Г., Огородников В.А., Тюнькин Е.С. Поведение оболочек под действием импульсной нагрузки. Малые возмущения // Журн. Прикл. механики и техн. физики. 1992. № 6. С. 112–115.
3. Огородников В.А. Вязкость и ее роль в динамических процессах. Саров: ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”, 2012. 238 с.
4. Зельдович В.И., Хейфец А.Э., Фролова Н.Ю., Хомская И.В., Смирнов Е.Б., Дегтярев А.А., Шорохов Е.В. Металлографическое исследование структурных изменений в меди, происходящих при схождении цилиндрических оболочек // ФММ. 2019. Т. 120. № 4. С. 381–388.
5. Зельдович В.И., Хейфец А.Э., Фролова Н.Ю., Дегтярев А.А., Смирнов Е.Б., Шорохов Е.В. Металлографическое исследование схождения медных цилиндрических оболочек при различной интенсивности взрывного нагружения // ФММ. 2021. Т. 122. № 6. С. 608–613.
6. Зельдович В.И., Фролова Н.Ю., Хейфец А.Э., Долгих С.М., Гаан К.В., Шорохов Е.В. Деформационные и термические процессы, происходящие при высокоскоростном схлопывании массивной цилиндрической оболочки из меди // ФММ. 2018. Т. 119. № 6. С. 573–581.
7. Зельдович В.И., Фролова Н.Ю., Хейфец А.Э., Хомская И.В., Дегтярев А.А., Шорохов Е.В., Смирнов Е.Б., Долгих С.М., Коваль А.В. Деформационные явления при схождении металлических цилиндрических оболочек. Потеря устойчивости // Физика горения и взрыва (ФГВ). 2019. Т. 55. № 4. С. 92–102.
8. Рыбин В.В., Ушанова Э.А., Золоторевский Н.Ю. Особенности строения разориентированных структур в бислойной пластине медь–медь, полученной сваркой взрывом // ЖТФ. 2013. Т. 83. С. 63–72.
9. Альтишулер Л.В., Кормер С.Б., Баканова А.А., Петрунин А.П., Фунтиков А.И., Губкин А.А. Нерегулярные режимы косоугольного столкновения ударных волн в твердых телах // ЖЭТФ. 1961. Т. 41. № 5 (11). С. 1382–1393.
10. Альтишулер Л.В. Применение ударных волн в физике высоких давлений // УФН. 1965. Т. 85. № 2. С. 197–258.

The Metallographic Study of High-Speed Deformation and Convergence of Thick-Walled Cylindrical Copper Shells under Explosive Loading

V. I. Ze'dovich^{1, *}, A. E. Kheifets¹, S. V. Valushkin², and V. I. Belyakov²

¹Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620990 Russia

²Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center—Zababakhin All—Russia Research Institute of technical Physics” (RFNC-VNIITF), Snezhinsk, Chelyabinsk region, 456770 Russia

*e-mail: zeldovich@imp.uran.ru

Abstract—Metallographic method investigated the process of convergence of thick-walled cylindrical copper shells under the action of an explosion. The explosion was initiated from eight points evenly spaced in a circle on the surface of the explosive surrounding the shell. At the intermediate stage of convergence, eight outliers formed on the inner surface of the shell. The convergence of the shells into the cylinder is completed by expanding and closing the emissions. The formation of outliers is explained by the occurrence of plastic (cumulative) jets at the deformation front. Jets occur when adjacent deformation projections collide. Areas of localized deformation were found inside and around the ejections, which is associated with this method of initiating an explosion. It is established that high-speed deformation of copper during the convergence of shells is accompanied by the formation of a large number of twins. There are more twins in the outer zones of the shells than in the inner ones.

Keywords: convergence of copper shells, explosive loading, high-speed deformation, metallography, macro- and microstructure, loss of stability during convergence, spalling phenomena