

СТРУКТУРА,
ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ДИФФУЗИЯ

УДК 669.3:539.89:539.2

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В МЕДИ, ПРОИСХОДЯЩИХ
ПРИ СХОЖДЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

© 2019 г. В. И. Зельдович^{а, *}, А. Э. Хейфец^а, Н. Ю. Фролова^а, И. В. Хомская^а,
Е. Б. Смирнов^б, А. А. Дегтярев^б, Е. В. Шорохов^б

^аИнститут физики металлов УрО РАН, 620108 Россия, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

^бРФЯЦ–ВНИИ технической физики им. акад. Е.И. Забабахина,
456770 Россия, Снежинск, Челябинской обл., а/я 245

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

Поступила в редакцию 12.07.2018 г.

После доработки 02.10.2018 г.

Принята к публикации 01.11.2018 г.

Выполнены эксперименты по схождению медных цилиндрических оболочек под действием скользящей ударной волны и последующее исследование полученных образцов методами металлографии. Рассмотрены откольные явления, происходящие в оболочках под действием ударных волн при нагружении: происходит либо разделение оболочки на концентрические кольца, либо образуется широкая зона откольных пор и трещин. При высокоскоростной деформации в процессе инерционного схождения поры и трещины залечиваются, следы залечивания сохраняются в микроструктуре. Установлены различные случаи отклонения от строго радиального схождения, т.е. случаи потери устойчивости круглого фронта деформации. На тонкостенной оболочке возникают изгибы, и оболочка при схождении комкается. В толстостенных оболочках на внутренней поверхности образуются периодически расположенные выступы, которые в дальнейшем соединяются, сходясь к центру оболочки. На внешней поверхности потеря устойчивости выражается в возникновении волнообразного рельефа, образовании выпуклостей и вмятин, происходит гофрирование.

Ключевые слова: схождение медных цилиндрических оболочек, макро- и микроструктура, откольные явления, высокоскоростная деформация, потеря устойчивости

DOI: 10.1134/S0015323019040168

ВВЕДЕНИЕ

Исследование схлопывания цилиндрических оболочек имеет большое значение в связи с изучением явления кумуляции [1], а также для решения некоторых технических задач [2]. При схлопывании материал оболочки подвергается высокоскоростной пластической деформации, исследование которой представляет самостоятельный интерес [3, 4]. Схлопывание оболочки происходит под действием ударной волны, возникающей при детонации взрывчатого вещества (ВВ), окружающего оболочку. При оптимальном подборе мощности заряда ВВ оболочка превращается в цилиндр, при меньшей мощности получается оболочка меньшего диаметра с более толстыми стенками. Схождение оболочки происходит вследствие инерционного движения материала оболочки, вызванного ударной волной при взрыве ВВ. Материал оболочки движется в радиальном направлении к ее оси. Действие ударной волны длится 1–2 мкс, схождение продолжается 30–50 мкс [5, 6]. Ско-

рость деформации возрастает от поверхности к центру и составляет 10^4 – 10^5 1/с.

Структурные изменения в металлических материалах при высокоскоростной деформации в процессе схождения оболочек практически не исследованы. Исключения составляют несколько работ, выполненных в Институте гидродинамики СО РАН [7–9], и исследования в РФЯЦ–ВНИИЭФ, обобщенные в [10]. Однако и в этих работах изменения структуры при высокоскоростной деформации исследованы недостаточно. Наблюдение структурных изменений при данном виде деформации должно способствовать дальнейшему пониманию явлений, происходящих при схлопывании оболочек. Цель настоящей работы состоит в нагружении четырех медных оболочек скользящими ударными волнами по разным режимам и металлографическом исследовании полученных образцов для анализа процессов, происходящих при схождении.

Таблица 1. Размеры оболочек

№ оболочек	Наружный диаметр оболочки, мм	Толщина оболочки, мм	Толщина слоя ВВ, мм
1	24	2	1
2	48	4	2
3	48	4	4
4	48	4	4

МЕТОДИКА НАГРУЖЕНИЯ ОБОЛОЧЕК И ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ

Размеры оболочек и толщина слоя ВВ, окружающего оболочку, приведены в табл. 1. Оболочки были приготовлены из отожженных прутков меди марки М1. Микроструктура оболочек в исходном недеформированном состоянии состояла из зерен размером 200–300 мкм с многочисленными двойниками отжига. Оболочка № 1 имела длину 200 мм. Один ее конец длиной 15 мм не был окружен слоем ВВ, так что был получен переходной участок длиной около 8 мм, на котором наблюдался постепенный переход от недеформированного состояния к деформированному.

Три другие оболочки имели поперечные размеры в 2 раза больше, чем первая. Для оболочек № 1 и 2 был соблюден принцип подобия по исходным размерам и толщине слоя ВВ. Для оболочки № 4 была выполнена рентгеновская регистрация начала схождения. На рис. 1 приведен снимок оболочки № 4 в процессе схождения, полученный методом импульсной рентгеновской съемки. Поверхность сходящейся оболочки образует с осевым направлением угол α . По известной для данного ВВ скорости детонации ($D = 7.8$ км/с) можно определить среднюю скорость u радиального схождения по соотношению

$$u \approx Dtg\alpha \approx 0.5 \text{ км/с.}$$

Такая скорость схождения близка к скоростям схождения, установленным в работах [7, 10]. По расстоянию, пройденному средней линией оболочки при схлопывании, и скорости схождения находим среднее время схождения. Оно составляет 30 мкс, что практически совпадает с измеренным временем схождения стальной оболочки [5]. Степень деформации сильно изменяется вдоль радиуса схлопнутого цилиндра. Истинная деформация e при радиальном схождении для любой материальной точки цилиндра определяется по соотношению

$$e = \ln(d_0/d),$$

где d_0 и d – диаметры, на которых расположены данные точки на оболочке и цилиндре [6]. На поверхности цилиндра $e = 0.5$, но на расстоянии 1 мм

от центра $e = 3$, т.е. при такой величине ($e \gg 1$) деформация вблизи центра может быть интенсивной. Скорость деформации составляет соответственно 1.7×10^4 и 10^5 1/с.

Деформированные оболочки разрезались поперек, на поперечных сечениях приготавливались шлифы; на травленых шлифах исследовали изменения макро- и микроструктуры на микроскопах ЕРІТУР и НЕОРНОТ при разных увеличениях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2 показана часть оболочки № 1 с переходным участком. Недеформированный участок имеет гладкую поверхность, на деформированном образовались выступы и вмятины. Посредине расположен переходной участок с переменным диаметром. Изменение микроструктуры на переходном участке можно интерпретировать как последовательные стадии процесса схождения данной оболочки, то есть развертку по длине представить как развертку во времени. Таким образом, можно получить представление о динамике процесса схождения.

Переходной участок был разрезан на три кольца, как показано на рис. 2, для последовательного наблюдения изменений микроструктуры. Толщина колец была 4.0, 1.3 и 3.2 мм, толщина реза ~ 0.3 мм. Снимок каждого кольца был выполнен с двух противоположных сторон, как показывают стрелки на рис. 2. На рис. 3 представлен вид шести полученных последовательных поперечных сечений переходного участка. Сечение 1.1 соответствует стрелке 1.1 на рис. 2, сечение 1.2 – стрелке 1.2 и т.д. На приведенных сечениях видно, что внутри оболочки формируется откол и что внутренняя поверхность сходящейся оболочки имеет выступы и впадины. Известно, что действие ударной волны с коротким импульсом на пластины и оболочки приводит к отколу части материала на тыльной стороне [10, 11]. Поэтому откол и разделение оболочки на два кольца это результат действия ударной волны.

Ударная волна сжатия, действующая при взрыве на наружную поверхность оболочки, со-

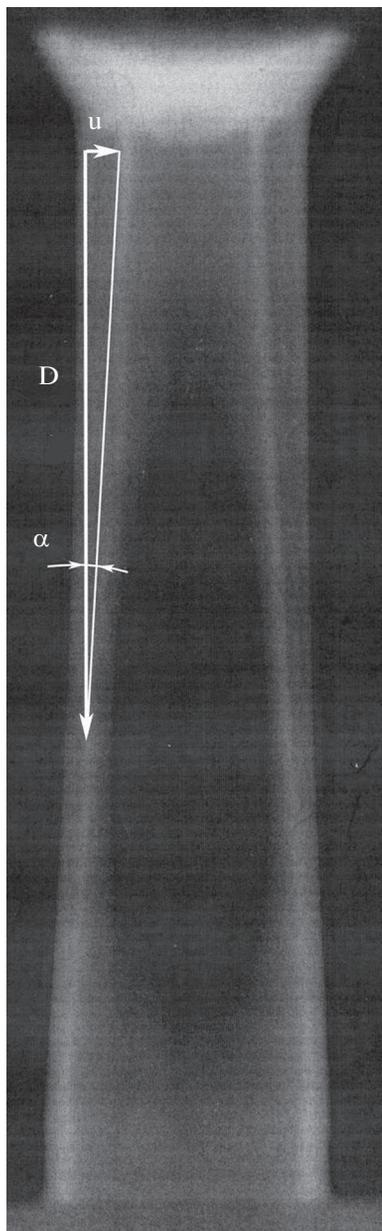


Рис. 1. Рентгеновский снимок схождения оболочки № 4.

здает импульс для движения материала оболочки к ее оси, т.е., для инерционного схождения оболочки. При строго радиальном схождении поверхность оболочки должна иметь форму прямого кругового цилиндра. Образование выступов указывает на потерю устойчивости при данной деформации [10, 12]. Рассмотрим, как происходит развитие откола и изменение формы фронта деформации при схождении. На первом сечении видно, что на внутренней поверхности сходящейся оболочки возникло два выступа (рис. 3, вид по стрелке 1.1). Следовательно, уже в начале схождения теряется устойчивость фронта деформации и нарушается аксиальная симметрия схождения.

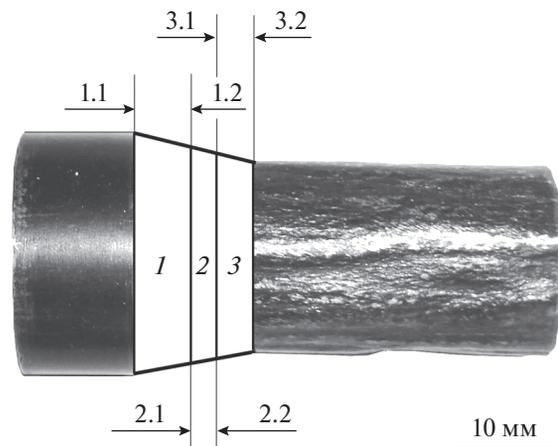


Рис. 2. Часть оболочки № 1 с переходным участком.

Вид по стрелке 1.2 (через 4.0 мм) показывает, что под выступами видны большие области откола. Под правым выступом видно три уровня откола, т.е. откол множественный. Видно начало возникновения откола по окружности, который в дальнейшем разделит оболочку на два кольца. Вид по стрелке 2.1 (всего через 0.3 мм) иллюстрирует образование новых выступов. Если считать только большие выступы, то их 9; но если также учесть намечающиеся, слабо выраженные, то их 11. Видно развитие откола по окружности, начало которого отмечено выше. Вид по стрелке 2.2 (через 1.3 мм) показывает те же 9–11 выступов на внутренней поверхности, но с обратной стороны. Наружный диаметр кольца уменьшился, до ~23 мм, и оно сжалось на ~1 мм. На большей части оболочки (на ~2/3 части ее окружности) произошло отделение внутреннего кольца от наружного. Также видно, что по окружности имеется второй слой отколовших трещин. Вид по стрелке 3.1 (через 0.3 мм) показывает, что произошло полное отделение внутреннего кольца от наружного на большей части оболочки. При схождении внутреннего кольца ранее возникшие 9 выступов увеличиваются и соприкасаются. Вид по стрелке 3.2 (через 3.2 мм) иллюстрирует схождение наружного кольца: кольцо имеет форму искаженного конуса с большим диаметром ~22 мм и малым ~19 мм. Деформация составляет 0.09 и 0.23 соответственно. Внутреннее кольцо продолжает отделяться от наружного и сминается. Толщина колец почти не изменяется, следовательно, схождение происходит за счет деформации изгиба. Отметим, что при соприкосновении соседних выступов сохраняются границы между ними и иногда остаются пустоты. Такие границы можно принять за трещины, как это сделано в [7].

Таким образом, при нагружении в результате откола данная оболочка разделяется на два кольца, которые деформируются (сходятся) независи-

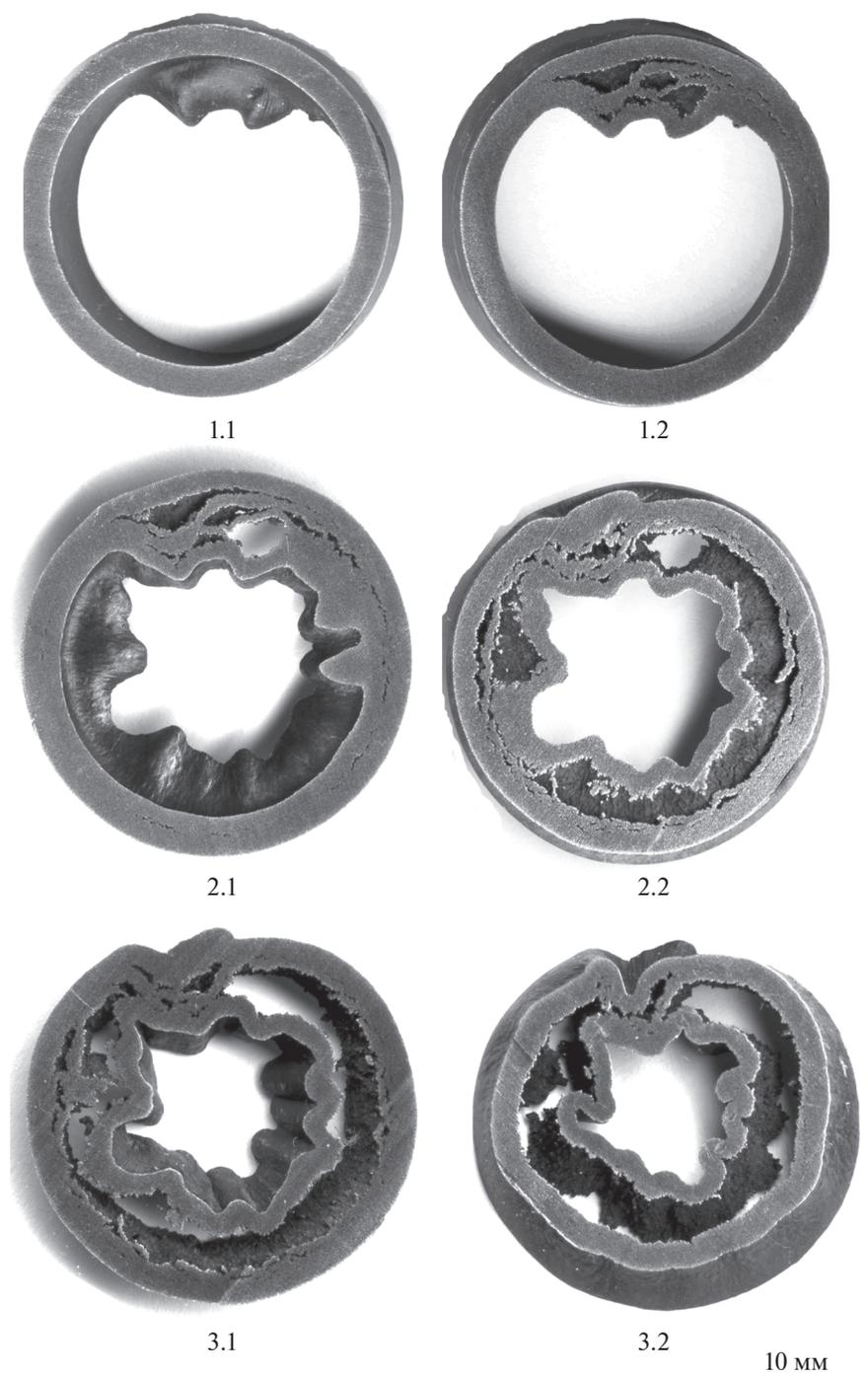


Рис. 3. Поперечные сечения переходного участка. Кольца 1, 2 и 3. Направления съемки каждого сечения указаны соответствующими стрелками на рис. 2.

мо. Внутреннее кольцо теряет устойчивость, на нем появляются выступы и вмятины. Далее кольцо сминается (комкается), и получается бесформенный комок. Наружное кольцо сходится, но незначительно (по сравнению с внутренним), и сохраняет форму, близкую к окружности, но с выступами на наружной поверхности. Так как

схождение внутреннего кольца происходит за счет деформации изгиба, данную оболочку следует считать тонкостенной.

Диаметр оболочки № 2, толщина стенки и слоя ВВ в два раза больше, чем у оболочки № 1. Можно было ожидать, что при сжатии будет выполняться принцип подобия [10]. Однако вид

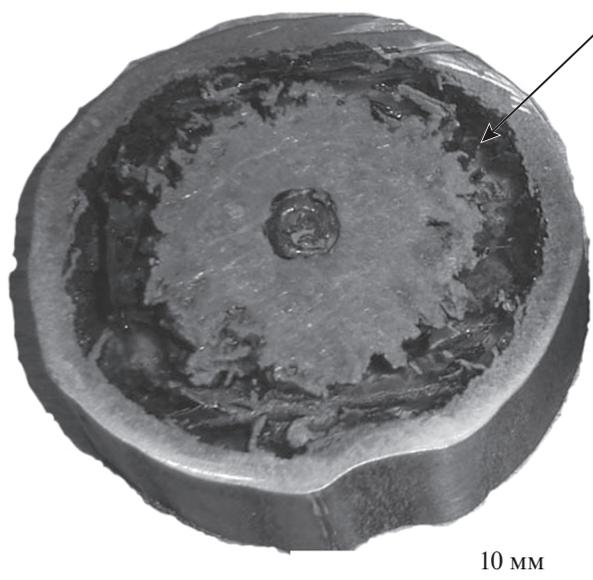


Рис. 4. Макроструктура оболочки № 2. Стрелкой указана зона откола.

деформации при схождении в них кардинально отличается, и поэтому принцип подобия в данном случае не выполняется. На рис. 4 представлена макроструктура поперечного сечения оболочки № 2. Эта оболочка, как и предыдущая, разделалась в результате откола на две части: наружное кольцо и внутренняя часть. Толщина наружного кольца около 2.5 мм, диаметр около 42 мм. Средняя деформация, определенная по уменьшению диаметра, $\epsilon = 0.13$. Микроструктура оболочки формируется за счет двух процессов: откола и высокоскоростной деформации. В наружном кольце откольные явления можно наблюдать “в чистом виде”, т. к. деформация незначительна. На рис. 5 представлены микропоры и трещины откольного происхождения. Округлая форма микропор свидетельствует о том, что они возникают под действием всесторонних растягивающих напряжений [11]. Микропоры зачастую выстраиваются в изогнутые цепочки, сливаются и образуют трещины. Не наблюдается преимущественного расположения трещин вдоль границ зерен. Во внутренней, отделившейся, части оболочки поры и трещины залечиваются в ходе деформации при схождении. При залечивании пор возникают вихреобразные структуры, на месте трещин – изломанные протяженные линии (рис. 6).

При инерционном схождении внутренней части оболочки № 2 деформация происходит иначе, чем в оболочке № 1. Никакого изгиба внутренней части оболочки не наблюдается. Следовательно, деформация осуществляется не изгибом, а сжатием. По этому признаку оболочку следует считать толстостенной. Деформация внутренней части

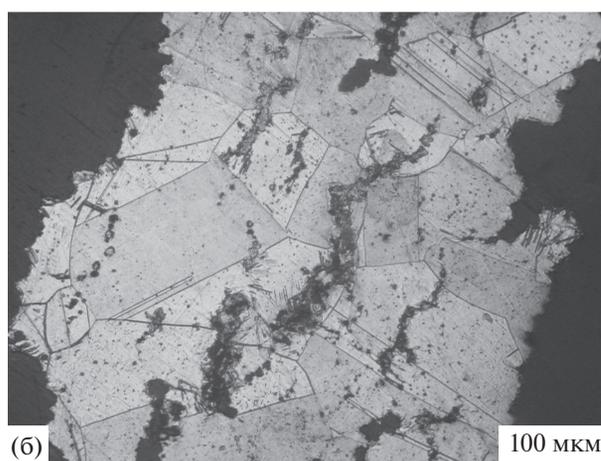
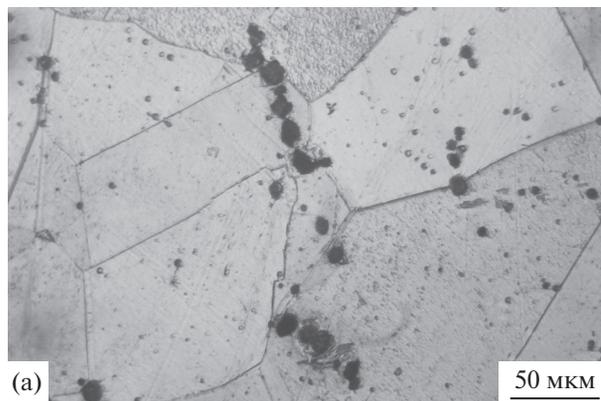


Рис. 5. Откольные поры (а) и трещины (б) в оболочке № 2.

изменяется по радиусу от ~ 0.6 на внешней ее поверхности до ~ 2.1 на внутренней. Потеря устойчивости при схождении внутренней части оболочки № 2 происходит иначе, чем в оболочке № 1. Внутренняя поверхность оболочки теряет центральную симметрию за счет возникновения выстулов (выбросов), что ярко проявилось при схождении оболочки № 3.

Оболочки № 3 и 4 были нагружены по одинаковому режиму. Из-за небольших неконтролируемых отклонений в параметрах нагружения при проведении опыта не получилось точного совпадения в конечном результате схождения. На рис. 7 представлена макроструктура поперечных сечений оболочек № 3 и 4. В этих оболочках деление на части не произошло. Откольные явления проявились в виде отдельных пор и трещин, расположенных в широкой средней зоне оболочек. Залечивание этих пор и трещин при последующей деформации происходит так же, как в оболочке № 2.

В макроструктуре поперечного сечения оболочки № 3 (рис. 7а) зафиксирован момент схождения, предшествующий полному схлопыванию

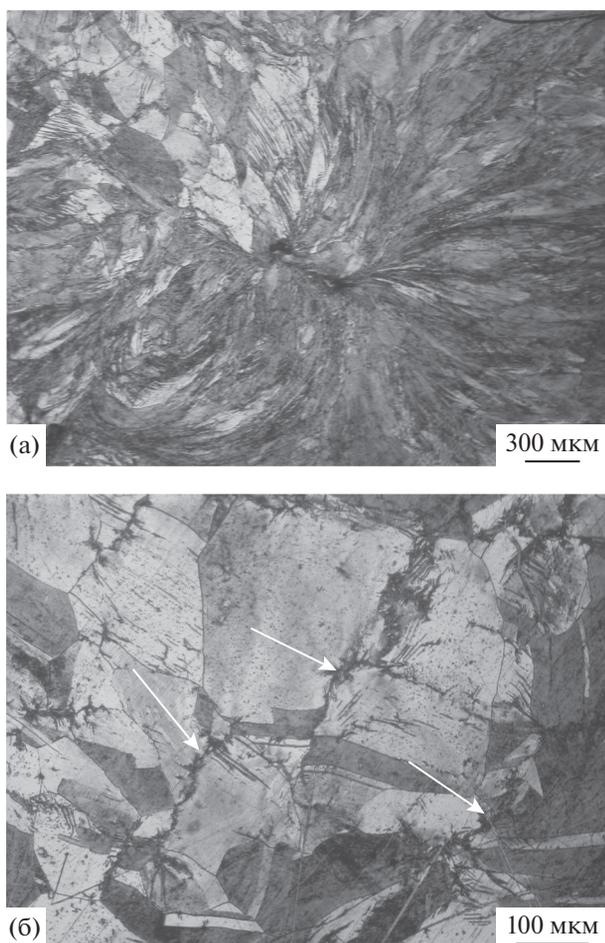


Рис. 6. Структуры, возникающие при залечивании откольных пор (а) и трещин (указаны стрелками, б).

оболочки. На внутренней поверхности возникло до 11 выступов (выбросов), значит, на этой стадии схождения произошла потеря устойчивости фронта деформации. Форма выступов говорит об их гидродинамическом происхождении, и, по-види-

мому, они соответствуют понятию “пластические струи”, которое ввел Рыбин при изучении сварки взрывом [13]. Это название отражает и форму, и происхождение выступов. В процессе дальнейшего схождения выступы сближаются и, наконец, соединяются. При соприкосновении выступов в микроструктуре сохраняются их боковые границы, похожие на трещины.

Структура поперечного сечения схлопнутого цилиндра оболочки №4 состоит из трех кольцевых зон (рис. 7б). Во внутренней и наружной зонах течение происходит преимущественно в радиальном направлении. В средней зоне оно носит хаотический характер. Во внутренней зоне образовалась симметричная фигура в виде цветка, состоящая из чередующихся удлиненных участков с большой степенью деформации и участков, деформированных слабее (рис. 7б). Очевидно, что такая структура сформировалась при слиянии ранее возникших выступов. На рис. 8 представлены характерные микроструктуры внутренней зоны в участке локализованной деформации и в соседнем участке. В первом видны следы течения и линии соприкосновения выступов, во втором – удлиненные в радиальном направлении зерна с многочисленными двойниками. Поверхность схлопнутой оболочки № 4 не строго цилиндрическая, на ней образовались выступы и вмятины (гофрирование). При гофрировании в разных местах по длине оболочки можно насчитать 12–14 выступов. Неустойчивость радиальной деформации во внешних слоях оболочки обусловлена сдвиговыми напряжениями, возникающими при схождении [1]. Под действием этих напряжений происходит локализация деформации в виде полос, исходящих из впадин и отклоненных от радиального направления на углы ~30 градусов.

В средней зоне расположены многочисленные залеченные поры и трещины, аналогичные описанным во внутренней части оболочки № 2. Ло-

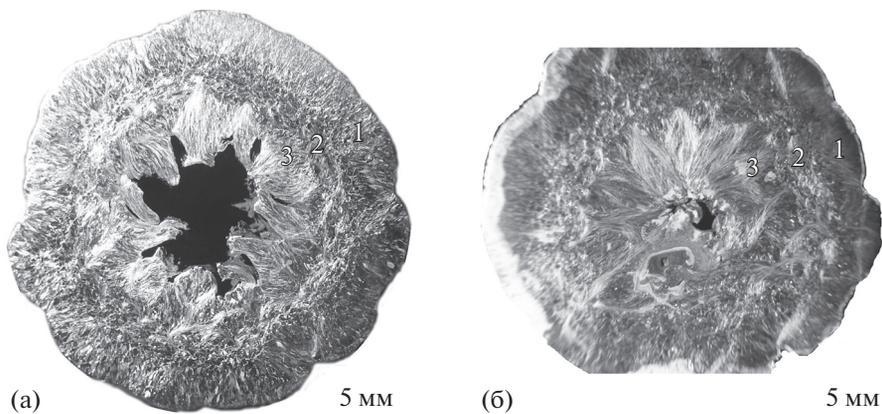


Рис. 7. Макроструктура оболочек № 3 (а) и 4 (б). Цифрами обозначены кольцевые зоны.

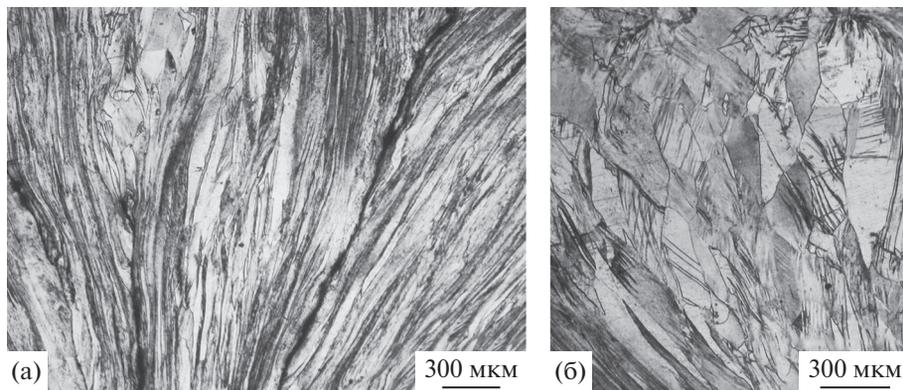


Рис. 8. Микроструктура в участке локализованного течения (а) и в соседней области (б).

кальные деформации при залечивании пор и трещин нарушают общий радиальный характер деформации. Деформированная структура в средней зоне крайне неоднородна и выглядит хаотической.

Отметим, что число выступов на всех поверхностях оболочек колеблется в пределах от 9 до 14. О таком же числе выступов при сжатии медных оболочек сообщается в монографии Огородникова [10]. Объяснение образования именно такого количества выступов отсутствует, приведенные в [10] расчеты не дали согласия с экспериментом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 9 представлены схемы схождения исследованных оболочек. Откол и деформация при сжатии в тонкостенной и толстостенных оболочках происходят по-разному. В тонкостенной оболочке откол сосредоточенный, происходит практически полное отделение внутреннего коль-

ца от наружного. В толстостенных оболочках имеется широкая кольцевая зона, в которой под действием растягивающих напряжений возникают многочисленные поры и трещины. Поры и трещины затем частично залечиваются при последующем инерционном сжатии оболочки. Следы залечивания остаются в микроструктуре.

При сжатии всех оболочек нарушается центральная симметрия деформационного фронта, т.е. происходит потеря устойчивости. В тонкостенной оболочке внутреннее кольцо теряет устойчивость по всей толщине под действием деформации изгиба. В результате оболочка сминается. При сжатии толстостенных оболочек на внутренней поверхности под действием деформации сжатия возникают периодически расположенные выступы, которые в дальнейшем соединяются, сходясь к центру оболочки. На внешней поверхности потеря устойчивости выражается в образовании выпуклостей и вмятин, т.е. приводит к гофрированию.

Необходимо отметить, что залечивание откольных пор и трещин при пластической деформации, а также потеря устойчивости по механизму образования гидродинамических выбросов являются особенностями высокоскоростной деформации при сжатии.

ВЫВОДЫ

1. Выполнено нагружение медных оболочек скользящей детонационной волной по разным режимам и металлографическое исследование полученных образцов.
2. Обнаружены и описаны откольные явления, происходящие в оболочках под действием ударных волн при нагружении. Откол приводит к разделению тонкостенной оболочки на кольца, либо к образованию откольных пор и трещин в средней зоне толстостенных оболочек.

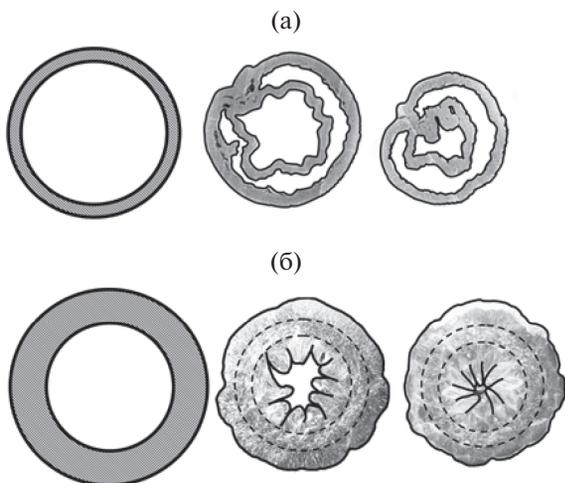


Рис. 9. Схемы схождения тонкостенной (а) и толстостенной оболочек (б).

3. Выявлены различные структурные механизмы нарушения строго радиального схождения, то есть потери устойчивости. В тонкостенной оболочке внутреннее кольцо при схождении изгибается по всей толщине, то есть устойчивость теряется во всем объеме кольца, и оболочка комкается. В толстостенных оболочках на внутренней поверхности под действием деформации сжатия возникают периодически расположенные выступы, которые в дальнейшем соединяются, сходясь к центру оболочки. На внешней поверхности образуются выпуклости и вмятины, происходит гофрирование.

Авторы благодарят академика РАН В.М. Счастливецова за обсуждение результатов исследования и сделанные замечания по изложению материала.

Работа выполнена в рамках темы “Структура” (№ АААА-А18-118020190116-6) при частичной поддержке Комплексной программы УрО РАН (проект 18-10-2-39).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Забабихин Е.И., Забабихин 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. *Добромыслов А.В., Талуц Н.И., Козлов Е.А., Петровцев А.В., Сапожников А.Т., Юсупов Д.Т.* Деформационное поведение меди в условиях нагружения сферически сходящимися ударными волнами. Высокоинтенсивный режим нагружения // ФММ. 2015. Т. 116. № 1. С. 101–113.
4. *Бродова И.Г., Петрова А.Н., Разоренов С.В., Шорохов Е.В.* Сопротивление высокоскоростному деформированию и разрушению субмикроструктурных алюминиевых сплавов после динамического канально-углового прессования // ФММ. 2015. Т. 116. № 5. С. 557–561.
5. *Зельдович В.И., Фролова Н.Ю., Хейфец А.Э., Долгих С.М., Гаан К.В., Шорохов Е.В.* Деформационно-температурные процессы, происходящие при схлопывании толстой цилиндрической оболочки из стали 20 // ФММ. 2015. Т. 116. № 3. С. 300–308.
6. *Хейфец А.Э., Зельдович В.И., Фролова Н.Ю., Долгих С.М., Гаан К.В., Шорохов Е.В.* Фазовые и структурные превращения в низкоуглеродистой стали, происходящие при схлопывании цилиндрической оболочки // ФММ. 2017. Т. 118. № 7. С. 715–724.
7. *Нестеренко В.Ф., Бондарь М.П.* Локализация деформации при схлопывании толстостенного цилиндра // ФГВ (Физика горения и взрыва). 1994. Т. 30. № 4. С. 99–111.
8. *Первухина О.Л.* Использование метода взрывного коллапса полого толстостенного цилиндра для выявления особенностей развития структуры в монокристаллах меди при высокоскоростном нагружении // Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4. С. 93–104.
9. *Бондарь М.П.* Локализация деформации в монокристаллах меди при взрывном коллапсе // ФГВ. 2003. Т. 39. № 1. С. 128–131.
10. *Огородников В.А.* Вязкость и ее роль в динамических процессах. Саров. ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”, 2012. 238 с.
11. *Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е.* Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 407 с.
12. *Вольмир А.С.* Устойчивость упругих систем. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1963. 879 с.
13. *Рыбин В.В., Ушанова Э.А., Золоторевский Н.Ю.* Особенности строения разориентированных структур в бислоистой пластине медь–медь, полученной сваркой взрывом // Журн. технической физики. 2013. Т. 83. Вып. 9. С. 63–72.