

УДК 669.3:621.7.044:620.186

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ СХОЖДЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК. ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ

В. И. Зельдович¹, Н. Ю. Фролова¹, А. Э. Хейфец¹, И. В. Хомская¹,
А. А. Дегтярев², Е. В. Шорохов², Е. Б. Смирнов², С. М. Долгих²,
А. В. Коваль²

¹Институт физики металлов УрО РАН, 620137 Екатеринбург, zeldovich@imp.uran.ru

²РФЯЦ, ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина, 456770 Снежинск

Исследованы структурные механизмы изменения формы и деформационное поведение медных и стальных цилиндрических оболочек (труб) при схождении под действием взрыва. Изучена зависимость деформационного поведения от поперечных размеров оболочки и свойств нагружаемого материала. Установлено, что устойчивость радиального схождения зависит не от относительных, а от абсолютных размеров оболочки; схождение оболочек большого диаметра протекает более устойчиво. Показано, что устойчивость схождения нарушается вследствие формирования в образце характерной картины локализованной деформации, состоящей из однотипных, упорядоченно расположенных структурных элементов, размер которых слабо зависит от свойств материала и условий эксперимента. Предложен критерий устойчивого радиального схождения, связывающий характерные размеры структурного элемента локализованной деформации и радиус оболочки.

Ключевые слова: схождение цилиндрических оболочек, высокоскоростная деформация, ударно-волновое нагружение, медь, сталь, макроструктура, неустойчивость.

DOI 10.15372/FGV20190412

ВВЕДЕНИЕ

Исследование схлопывания металлических цилиндрических оболочек под действием взрыва представляет собой одно из направлений изучения кумуляции [1, 2]. Схлопывание осуществляется под действием взрыва заряда взрывчатого вещества (ВВ), окружающего оболочку. При недостаточной мощности заряда ВВ полного схлопывания не достигается. В результате образуется оболочка меньшего радиуса и большей толщины. При избыточной мощности заряда происходит кумуляция энергии, на завершающей стадии схождения скорость вещества неограниченно возрастает; в этом случае после схлопывания возможен разлет оболочки. Особый интерес представляет случай, когда мощность заряда ВВ подбирается таким образом, что происходит полное схлопывание обо-

лочки, но к моменту окончания процесса схождения вся энергия ВВ оказывается израсходованной. В этом случае в результате схлопывания удастся получить сплошной цилиндр без следов разрушения, обусловленных кумуляцией. При этом специфические условия нагружения (ударно-волновое воздействие и высокоскоростная деформация, величина и скорость которой изменяются вдоль радиуса цилиндра в широких пределах) приводят к формированию необычных структурных состояний в нагружаемом материале. Исследование этих структурных состояний представляет несомненный интерес для физического материаловедения и понимания физики процессов, протекающих в материале при высокоскоростном деформировании. Таким образом, схлопывание оболочек является одним из методов изучения структуры и свойств металлов и сплавов при деформировании со скоростями порядка $10^4 \div 10^5 \text{ с}^{-1}$; при этом значительное изменение степени деформации вдоль радиуса позволяет исследовать деформационное поведение материала в широком диапазоне степеней высокоскоростной дефор-

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России по теме «Структура» (N АААА-А18-118020190116-6).

© 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., 2019.

мации на одном образце.

Важно подчеркнуть, что при схлопывании оболочки под действием взрыва, несмотря на высокую скорость протекающих процессов, в отличие от большинства других видов ударно-волнового нагружения, деформация материала осуществляется квазиadiaбатически. Процесс нагружения оболочки можно разделить на два этапа, отличающихся по продолжительности. Первый этап состоит в действии ударной волны на материал оболочки. При скорости ударной волны ≈ 5 км/с и толщине стенки оболочки ≈ 5 мм он длится ≈ 1 мкс. Второй этап начинается одновременно с первым и заключается в инерционном сжатии оболочки. На этом этапе происходит высокоскоростная деформация и оболочка полностью или частично преобразуется в цилиндр. Длительность второго этапа на порядок больше, чем первого [3, 4]. На втором этапе материал движется по инерции, без подвода энергии извне. При этом скорость деформации хотя и велика, но существенно меньше, чем в ударных волнах и сверхзвуковых гидродинамических течениях. В движущемся по инерции веществе успевают пройти релаксационные процессы, возникают закономерные, обусловленные геометрией эксперимента эффекты локализации деформации и формируются сложные гидродинамические течения, приводящие к изменению формы оболочки [5]. Таким образом, эксперименты по схлопыванию оболочек занимают промежуточное положение между экспериментами по ударно-волновому нагружению и квазистатическому деформированию.

Сжатие оболочки зачастую не является идеально осесимметричным. При изменении радиуса и толщины в процессе сжатия на поверхности оболочки возникают возмущения, обусловленные неустойчивостью течения материала. Поверхность оболочки становится волнистой. Количество волн, их форма и амплитуда зависят от свойств материала и геометрии эксперимента. Соответствующие возмущения наблюдаются и в объеме, проявляясь в структуре нагруженных образцов в виде эффектов локализованной деформации. Возмущения, приводящие к существенному искажению цилиндрической формы сходящейся оболочки, будем считать неустойчивостью радиального течения, а возмущения, приводящие к нарушению «гладкости» поверхности при сохранении цилиндрической формы, — малыми возмуще-

ниями. В научной литературе известны попытки теоретического описания развития малых возмущений и неустойчивости при сжатии оболочек на основе различных упругопластических и ударно-волновых моделей, однако, как отмечается в [6], «в целом надо признать справедливость утверждения о том, что в настоящее время отсутствуют общепризнанные критерии... неустойчивого движения оболочек».

В условиях отсутствия четких теоретических представлений о развитии малых возмущений и неустойчивости радиального течения при сжатии представляют интерес анализ экспериментальных результатов, полученных в опытах с различными условиями нагружения, классификация наблюдаемых явлений и обнаружение эмпирических закономерностей развития неустойчивости. Результаты таких исследований могут служить источником недостающих данных и научной основой для развития адекватных представлений о процессах, протекающих при сжатии.

Цель данной работы состояла в исследовании макро- и микроструктурных закономерностей деформационного поведения и механизмов изменения формы оболочек при сжатии в зависимости от размеров оболочки и свойств нагружаемого материала.

1. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходные металлические оболочки различного диаметра окружались цилиндрическим слоем бризантного ВВ. Иницирование взрыва осуществляли с торца ВВ с помощью кольцевой системы иницирования, подробно описанной ниже.

Для выявления влияния связи размера оболочки и развивающейся при сжатии неустойчивости течения проводилось нагружение оболочек различного диаметра и с различной толщиной стенок. Совокупность экспериментальных данных, рассмотренных в настоящей работе, приведена в таблице.

Нагружались оболочки трех типов, длиной 200 мм и более, условно названные «малые», «средние» и «большие». Некоторые различия в размерах больших оболочек из меди и стали и в параметрах нагружения обусловлены тем, что условия эксперимента эмпирически подбирались таким образом, чтобы добиться полного сжатия оболочек из материалов с различны-

Параметры экспериментов по нагружению оболочек

Тип оболочек	Материал оболочек	Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Отношение толщины стенки к радиусу
Малые	Медь М1	24	2	0.166
Средние	Медь М1, сталь 20	48	4	0.166
Большие	Медь М1, сталь 20	118 ÷ 130	5.7 ÷ 5.9	0.09 ÷ 0.096

ми прочностными свойствами без избытка подводимой энергии.

Исследуемые малые и средние оболочки сходились под действием детонирующих в режиме скользящей детонации слоев пластического ВВ на основе тэна, расположенных на боковой поверхности оболочек. При нагружении больших оболочек использовался массивный металлический корпус, замедляющий разлет продуктов взрыва, а пространство между оболочкой и корпусом заполнялось алюминизированным бризантным ВВ. Иницирование детонации начиналось от электродетонатора, расположенного на оси оболочки вблизи ее торца, от детонатора детонационная волна распространялась по осевому прутку из ВВ и затем по расположенному на торце оболочки промежуточному листу из пластического ВВ выходила на боковую поверхность. Далее вдоль боковой поверхности оболочки распространялась скользящая детонационная волна, под действием которой происходило схождение оболочки к оси симметрии. Стальные пластины прикрывали торцы нагружаемых оболочек и препятствовали затеканию продуктов взрыва во внутреннюю полость. Для предотвращения или ослабления откольного разрушения стенок оболочек в процессе схождения в некоторых экспериментах между оболочкой и ВВ вводились дополнительные демпфирующие слои из конденсаторной бумаги.

Нагруженные оболочки были изготовлены из отожженных прутков, микроструктура меди в исходном недеформированном состоянии состояла из зерен размером 200 ÷ 300 мкм с многочисленными двойниками отжига; сталь имела ферритоперлитную структуру с содержанием перлита ≈ 20 %.

Для исследования макро- и микроструктуры цилиндры, полученные при схлопывании оболочек, разрезали по поперечному сечению. Металлографические исследования выполнены на микроскопе EpiType 2.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Малая оболочка

При нагружении одной из малых оболочек ее конец длиной ≈ 15 мм не был окружен слоем ВВ, так что был получен переходный участок длиной ≈ 10 мм, на котором происходил постепенный переход от недеформированного состояния к деформированному. На рис. 1,а показана часть этой оболочки с переходным участком. Недеформированный участок имеет гладкую поверхность, на деформированном образовались выступы и вмятины. Между ними расположен переходный участок переменного диаметра. Изменение макроструктуры вдоль длины на переходном участке можно интерпретировать как последовательность стадий процесса схождения данной оболочки, т. е. развертку по длине представить как развертку во времени. Таким образом можно получить представление о динамике процесса схождения.

Переходный участок был разрезан на три кольца для последовательного наблюдения изменений макроструктуры. Толщина колец 4.0, 1.3 и 3.2 мм, толщина реза ≈ 0.3 мм. Соответствующие сечения представлены на рис. 1,б. На них видно, что внутри оболочки формируется откол и форма внутренней поверхности 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 (для оболочки — внутренней) стороне [7–9].

Ударная волна сжатия, действующая при взрыве на наружную поверхность оболочки, создает импульс для инерционного схождения оболочки к оси. При строго радиальном схождении поверхность сходящейся оболочки имеет форму окружности. Образование выступов указывает на потерю устойчивости [6, 8]. Рассмотрим, как происходит развитие откола и изменение формы оболочки при схождении. На

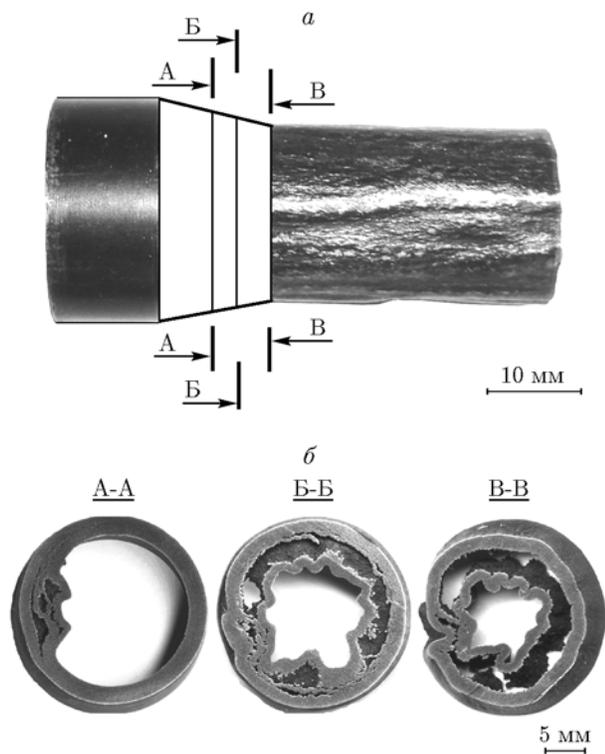


Рис. 1. Переходный участок и схема разрезов малой медной оболочки (а). Последовательность развития откола и неустойчивости (б)

первом сечении видно возникновение двух выступов на внутренней поверхности сходящейся оболочки (см. рис. 1, б). Следовательно, уже в начале схождения теряется устойчивость фронта деформации и нарушается центральная симметрия схождения. Под выступами наблюдается три уровня откола, т. е. откол множественный. Возникновение откола начинается по окружности, в дальнейшем он разделяет оболочку на два кольца. Следующее сечение иллюстрирует развитие откола и образование новых выступов при схождении оболочки. Если считать только большие выступы, то их 9; но если также учесть намечающиеся, слабо выраженные, то их 11. Можно заметить тенденцию к возникновению выступов парами. На большей части оболочки ($\approx 2/3$ ее окружности) произошло отделение внутреннего кольца от наружного. Однако полный откол по толщине шайбы еще отсутствует. Поверхность откола при визуальном рассмотрении крайне неровная, шероховатая. По окружности также виден второй слой откольных трещин.

При дальнейшем схождении внутреннего кольца ранее возникшие выступы увеличива-

ются и соприкасаются, внутреннее кольцо продолжает отделяться от наружного и сминается. На внешней поверхности оболочки намечаются чередующиеся впадины и выступы. Форма поверхности откола повторяет выступы и впадины на внутреннем кольце. Толщина колец почти не изменяется, следовательно, схождение происходит за счет деформации изгиба.

Отметим, что при соприкосновении соседних выступов сохраняется граница между ними и иногда остаются пустоты. Такие границы можно принять за трещины, как это сделано в [10].

Таким образом, при нагружении малой медной оболочки в результате откола она разделяется на два кольца, которые сходятся независимо. Внутреннее кольцо теряет устойчивость, на нем появляются выступы и вмятины. Далее кольцо сминается. Наружное кольцо, по сравнению с внутренним, сжимается незначительно и сохраняет форму, близкую к окружности с выступами на наружной поверхности.

2.2. Средние оболочки

Размеры средних оболочек в два раза больше малой, однако пропорции сохраняются (см. таблицу). Несмотря на одинаковые пропорции, характер деформации при схождении средних оболочек кардинально отличается от деформации рассмотренных выше малых оболочек.

На рис. 2 представлена макроструктура поперечных сечений цилиндров, полученных при схождении двух средних медных оболочек, нагруженных в одинаковых условиях. Из-за небольших неконтролируемых особенностей нагружения не получилось точного совпадения в конечном результате схождения. Первая оболочка (рис. 2, а) сошлась не полностью, вторая (рис. 2, б) — практически полностью. В силу близости условий нагружения этих оболочек можно считать, что в приведенных на рис. 2 макроструктурах зафиксированы разные стадии одного и того же процесса.

Структуру оболочек можно разделить на три характерные кольцевые зоны (см. 1–3 на рис. 2). Деформация в первой (внешней) зоне носит преимущественно радиальный характер, однако имеют место закономерные (периодические) отклонения от строгого радиального течения. В результате происходит «гофрирование» оболочки и на внешней поверхности формируется характерный волнистый рельеф, состоящий из чередующихся выпуклостей и

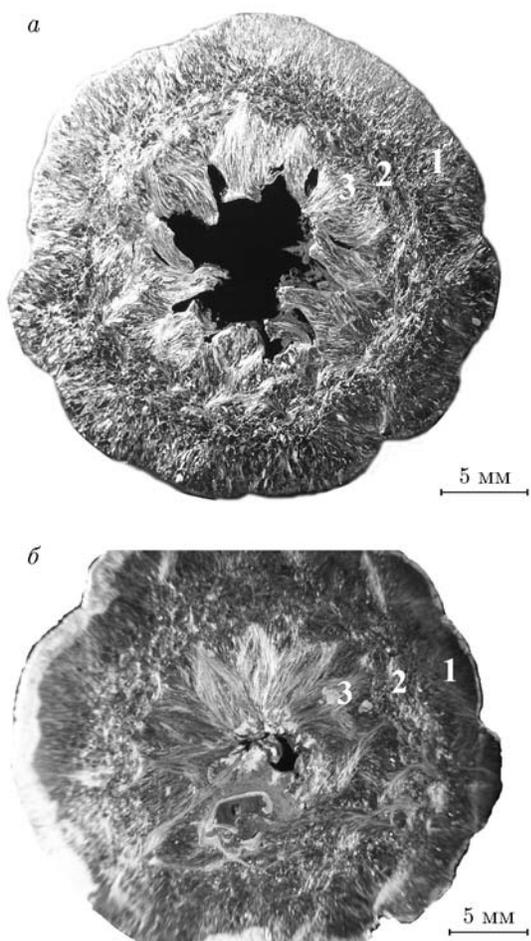


Рис. 2. Завершающие стадии схождения средних медных оболочек:

a — не полностью сошедшая оболочка, *б* — практически полностью сошедшая оболочка

вмятин. Насчитывается $12 \div 14$ таких волн. Наблюдающуюся неустойчивость радиального течения во внешних слоях оболочки (первая зона) можно объяснить сдвиговыми напряжениями, возникающими при схождении [1]. Под действием этих напряжений происходит локализация деформации в виде полос, исходящих из вмятин и отклоненных от радиального направления на угол $\approx 30^\circ$ (рис. 3, *a*).

Локализованная деформация во второй зоне преимущественно хаотическая. В макроструктуре второй зоны (см. рис. 2), в отличие от первой и третьей, не видно закономерно расположенных структурных элементов и «узоров» течений, указывающих на организованный характер развития возмущений и на потерю устойчивости радиального течения. Микроструктура второй зоны обусловлена залечи-

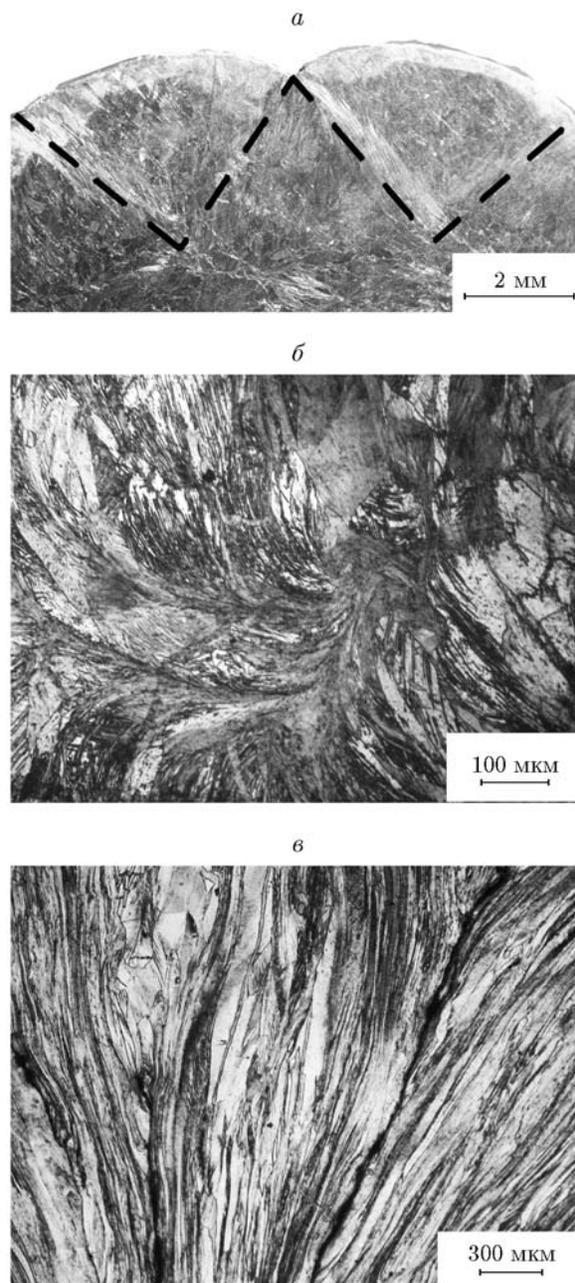


Рис. 3. Локализация деформации в первой (*a*), второй (*б*) и третьей (*в*) зонах средних оболочек:

a — наклонные полосы локализованной деформации вблизи внешней поверхности, *б* — залечивание откольных повреждений, *в* — локализация деформации при слиянии «лепестков цветка» вблизи центра

ванием многочисленных откольных повреждений, возникших в этой части оболочки на стадии прохождения ударной волны [5]. В отличие от малой оболочки, рассмотренной выше,

в средних оболочках удалось подобрать такие условия нагружения, при которых не происходит разделения оболочки на два кольца. Тем не менее, растягивающие напряжения, возникающие при выходе ударной волны на внутреннюю поверхность оболочки, приводят к появлению в средней зоне многочисленных пор и трещин. При последующей деформации в процессе схождения эти дефекты залечиваются, в результате в микроструктуре возникают характерные следы локализованной деформации (рис. 3, б). Поскольку откольные поры и трещины возникают хаотически, локализованная деформация во второй зоне также имеет хаотический характер.

В третьей зоне локализация деформации вновь становится закономерной. На внутренней поверхности оболочки на завершающих стадиях схождения формируется порядка десяти выступов (см. рис. 2, а). Форма выступов свидетельствует об их гидродинамическом происхождении, и для них подходит определение «пластические струи», которое ввел В. В. Рыбин при изучении сварки взрывом [11]. Оно отражает и форму, и происхождение выступов. В процессе дальнейшего схождения выступы сближаются и наконец соединяются. В результате слияния выступов в середине схлопнутой оболочки образуется симметричная фигура в виде цветка (см. рис. 2, б), состоящая из чередующихся удлиненных участков с большей и меньшей степенью деформации. При соприкосновении выступов («лепестков цветка») в микроструктуре сохраняются их боковые границы, похожие на трещины (см. рис. 3, б).

Отметим, что наличие зоны хаотической локализованной деформации в макроструктуре (вторая зона) свидетельствует о том, что локализация деформации и развитие организованных возмущений на внешней и внутренней поверхностях оболочек происходят независимо друг от друга. Вторая зона нарушает связь между локализованными течениями первой и третьей зон. При этом число выступов как на внешней, так и на внутренней поверхности оболочки примерно одинаково и колеблется в пределах от 9 до 14. Столько же выступов при схождении медных оболочек приведено в монографии [6].

Для сравнения процессов схождения средних оболочек из различных материалов с разными прочностными свойствами и выявления роли материала оболочек рассмотрим экспе-

римент с образцами с оболочкой из стали 20. Условия нагружения и размеры стальной оболочки были такими же, как при нагружении описанных выше медных оболочек. На рис. 4 приведены два поперечных сечения сошедшей стальной оболочки. Из-за небольших флуктуаций давления по длине оболочки в некоторых сечениях произошло почти полное, а в некоторых — неполное схождение. Как и в рассмотренных ранее случаях схождения малой и средних медных оболочек, приведенные на рис. 4 сечения можно считать разверткой во времени процесса схождения стальной оболочки. Макроструктура стальной оболочки сильно отличается от макроструктуры медных. Видна разница в процессе откольного разрушения и деформационного схождения.

На наружной поверхности стальной оболочки образовались выступы, однако, в отличие от выступов в медных оболочках, они четко ограничены полосами адиабатического сдвига и трещинами. Как видно из рис. 4, оболочка частично распалась на фрагменты. Форма фрагментов вблизи внешней поверхности имеет явное сходство с областями локализованной деформации вблизи внешней поверхности медной оболочки, приведенными на рис. 3, а. То есть реализуется один и тот же деформационный механизм, однако в силу различия свойств нагружаемых материалов этот механизм приводит к различным конечным результатам. В стали при высокоскоростной деформации образуются полосы адиабатического сдвига. Медь, в отличие от стали, имеет высокую теплопроводность, области локального нагрева в ней не возникают. Как следствие, полосы адиабатического сдвига не образуются, а полосы сдвига — широкие и «размытые» (см. рис. 3, а).

Помимо сильной локализации деформации в виде полос адиабатического сдвига и трещин, обратим внимание на особенности откола, отличающие его от откольных явлений в медных оболочках, нагруженных в таком же режиме. Во-первых, в стальной оболочке откол привел к ее разделению на два кольца, чего не было в соответствующих медных оболочках. Во-вторых, откол сосредоточенный, в то время как в медных оболочках образуется довольно широкая область откольных пор и трещин. Эти особенности объясняются более высокой прочностью и меньшей пластичностью стали по сравнению с медью. В-третьих, откол произошел практически по окружности, что дополнительно

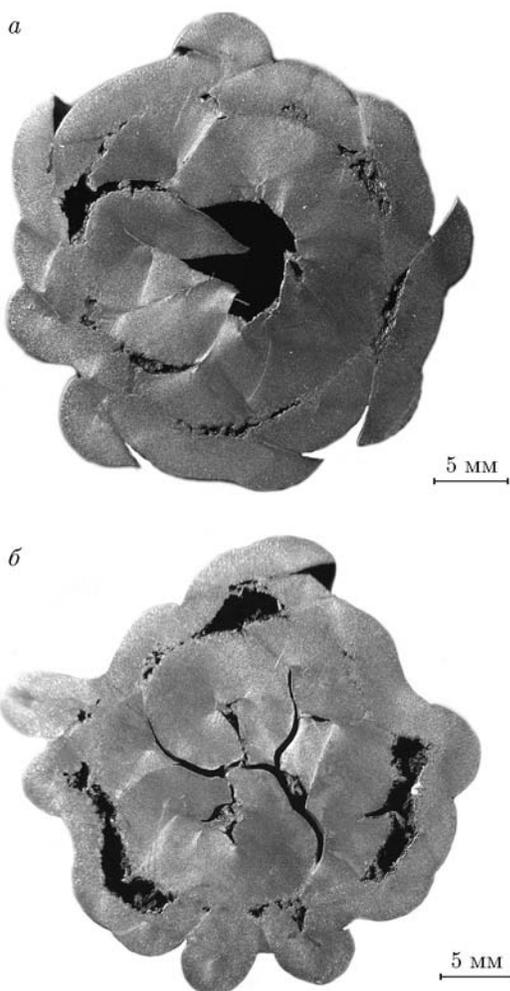


Рис. 4. Завершающие стадии схождения средней стальной оболочки:

a — формирование выступов на внутренней поверхности, *б* — их слияние

но подтверждает тот факт, что откол происходит раньше деформации схождения.

Как и в случае медных оболочек, зона откола в стальной оболочке разделяет внешнюю и внутреннюю зоны, т. е. деформация на внешней и внутренней поверхностях оболочки возникает независимо.

Резюмируя сказанное выше, можно заключить, что в целом при схождении средней стальной оболочки имеют место те же процессы и явления, что и в медных оболочках, однако различия в свойствах материала сказываются на структуре полученных цилиндров. В медных оболочках узоры течений имеют более совершенную форму и правильную симметрию. В стали фрагменты оболочки лишь от-

части укладываются в полученную на медных оболочках картину. По-видимому, это связано с тем, что в более прочном, менее пластичном и теплопроводном материале, каким является сталь, локализованная деформация реализуется посредством полос адиабатического сдвига, и поэтому совершенная, определяемая гидродинамикой картина деформационного поведения оболочки искажается.

Отметим, что количество выступов на поверхности стальной оболочки (см. рис. 4) примерно соответствует их количеству на поверхности медных оболочек. То есть, несмотря на то, что свойства материала и индивидуальные особенности образца вносят искажения в процесс схождения, сам механизм деформации не изменяется и не зависит от свойств материала.

2.3. Большие оболочки

На рис. 5 представлены два поперечных сечения большой медной оболочки. Микроструктурные изменения и распределение температуры в этой оболочке подробно обсуждались в [12]. Так же, как и в случае средней стальной оболочки, из-за флуктуаций давления по длине оболочки в некоторых сечениях произошло почти полное, а в некоторых — частичное схождение. Аналогично рассмотренным ранее случаям, приведенные на рис. 5 сечения фиксируют один и тот же процесс на разных стадиях.

На макроструктуре видно, что, в сравнении с малыми и средними оболочками (см. рис. 1, 2, 4), движение при схождении больших медных оболочек гораздо более устойчиво и симметрично. Форма оболочки почти идеально круглая, на внешней поверхности нет рельефа, а вытравленная на шлифах волокнистость материала представляет собой радиальные линии, строго сходящиеся к центру. То есть на внешней поверхности и в большей части объема оболочки движение носит устойчивый радиальный характер. В то же время полость в центре сечения на рис. 5, *a* не круглая; на внутренней поверхности большой оболочки прослеживается формирование выступов, аналогичных тем, которые формируются в центральной части средних оболочек (см. рис. 2, *a*), но их очертания менее четкие, чем в средних оболочках, и их количество сложно подсчитать. Тем не менее, для больших оболочек прослеживается та же тенденция к нарушению осесимметричного движения, т. е. на завершающей стадии схождения устойчивость радиального течения вбли-

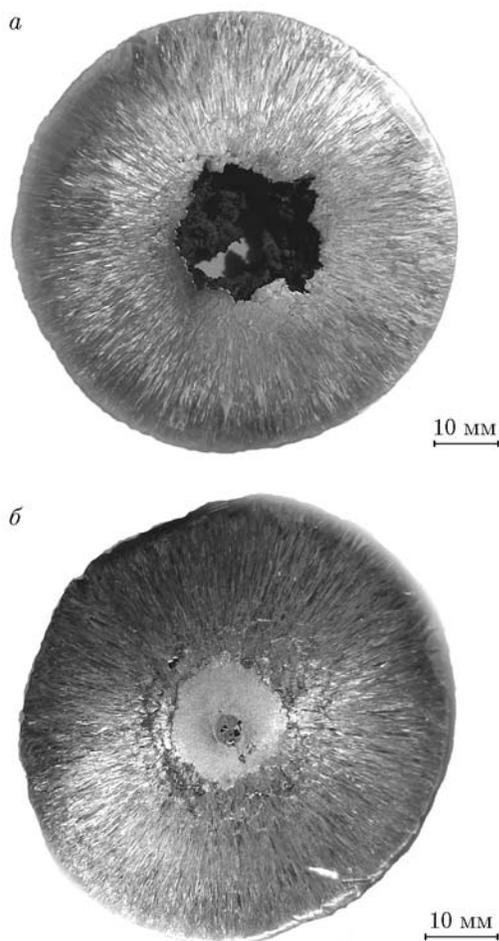


Рис. 5. Завершающие стадии схождения большой медной оболочки:

a — неустойчивость на внутренней поверхности,
б — формирование в центральной части оболочки области рекристаллизации

зи внутренней поверхности оболочки теряется. Можно было бы ожидать, что в центральной части приведенного на рис. 5, *б* сечения схлопнутой оболочки будет наблюдаться некая фигура, аналогичная «цветку» на рис. 2, *б*, однако из-за более высокой по сравнению со средними медными оболочками температуры следы этой фигуры стерты произошедшей в этой зоне рекристаллизацией и плавлением с последующей кристаллизацией (см. концентрические круглые зоны в центре сечения на рис. 5, *б* и в [12]).

Сравним особенности схождения больших оболочек из меди и стали. Поперечное сечение цилиндра, полученного при схлопывании стальной оболочки, представлено на рис. 6, *а*. В отличие от других оболочек, рассмотренных в данной работе, зафиксировать завершающие

стадии процесса схождения не удалось. Здесь, как и в случае медной оболочки соответствующего размера, сечение цилиндра представляет собой круг без следов искажения, свидетельствующих о развитии неустойчивости и нарушении симметрии радиального течения. Однако при сравнении сошедшихся медной и стальной оболочек (ср. рис. 5, *б* и 6, *а*) заметны некоторые различия. Так, на рис. 6, *а* в центральной зоне стального цилиндра видна область с сильной локализацией деформации (обведена светлой окружностью). На рис. 6, *б* эта область представлена при большем увеличении. Видно, что сформировавшаяся картина течений существенно менее совершенна, чем цветок в центральной зоне медной средней оболочки (см. рис. 2, *б*). Так же, как и в средней стальной оболочке, материал дробится на фрагменты, очерченные полосами адиабатического сдвига (ср. рис. 6, *б* и 4, *б*). Наблюдаемая картина с сильной локализацией деформации указывает на то, что на завершающих стадиях схождения на внутренней поверхности движение становится неустойчивым, несмотря на устойчивость радиального движения оболочки в целом.

Второе отличие большой стальной оболочки от медной состоит в наличии рельефа на поверхности. На боковой поверхности полученного при схлопывании цилиндра образовались выступы в форме треугольных призм с острыми краями (рис. 6, *а* и при большем увеличении рис. 6, *в*). В поперечном сечении призмы представляют собой близкие к равносторонним треугольникам, ограниченные полосами адиабатического сдвига и частично выступающие над поверхностью цилиндра. Очевидно, что такая организованная локализация деформации вблизи внешней поверхности оболочки имеет ту же природу, что и локализация в средней стальной оболочке (см. рис. 4), однако в данном случае это не привело к потере устойчивости. Оболочка сохранила идеальную цилиндрическую форму, поэтому сформировавшийся рельеф можно считать малыми возмущениями на поверхности, не искажающими геометрию схождения.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже отмечалось, основной целью данного исследования было выявление закономерностей развития неустойчивости из сопоставления результатов экспериментов по нагружению малых, средних и больших оболочек из

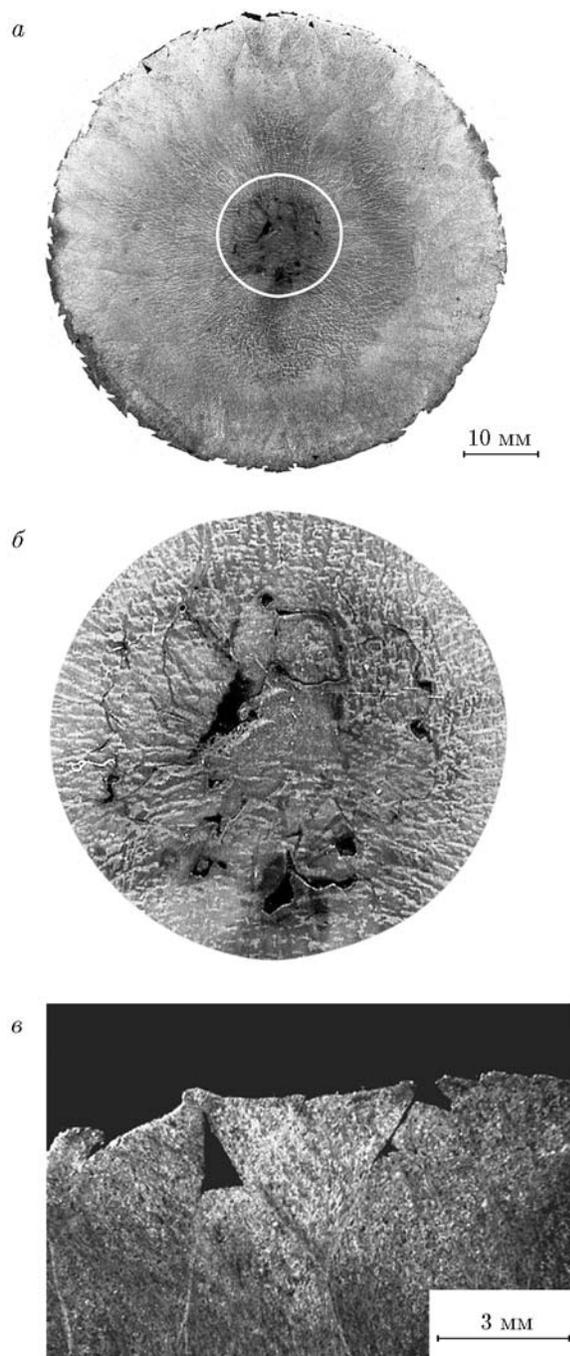


Рис. 6. Схождение большой стальной оболочки:

a — поперечное сечение сошедшей оболочки, зона неустойчивости обведена светлой окружностью; *b* — зона неустойчивости в центре при большем увеличении; *c* — локализация деформации вблизи поверхности

стали и меди. Сравнение деформационного поведения медных оболочек разных размеров (см. рис. 1, *b*, 2 и 5) показало, что чем больше раз-

мер, тем больше устойчивость внешних слоев оболочек. Малая оболочка, или точнее внутреннее отделившееся в результате откола кольцо, превращается в бесформенный комок. Поверхность средних оболочек гофрируется, а большие оболочки сохраняют форму правильного цилиндра. Та же тенденция прослеживается при сравнении средней и большой стальных оболочек. Форма средней оболочки искажена сильно, а большой — значительно слабее (ср. рис. 4 и 6, *a*). Таким образом, неустойчивость на внешней поверхности оболочек связана с абсолютным, а не с относительным размером оболочки. Иными словами, известный в физике ударных волн закон подобия [1, 6], согласно которому при изменении масштаба ударно-волновых экспериментов наблюдаемые эффекты тоже соответствующим образом масштабируются, не выполняется в случае инерционного схождения оболочек.

Важно подчеркнуть, что большие оболочки в относительном масштабе, определяемом отношением толщины стенки к радиусу, имеют более тонкие стенки, чем малые и средние (см. таблицу). Более того, отношение толщины стенки к радиусу большой медной оболочки приблизительно равно соответствующему соотношению для отделившегося при отколе внутреннего кольца малой оболочки. То есть, даже если рассматривать отколовшееся внутреннее кольцо малой оболочки как независимую тонкостенную оболочку, эта оболочка («комкающееся» кольцо на рис. 1, *b*, разрез В–В) и большая оболочка, приведенная на рис. 5, по соотношению размеров являются подобными. В то же время процесс их схождения качественно различается: движение большой оболочки на рис. 5, кроме центральной зоны, устойчиво, а движение внутреннего кольца малой оболочки на рис. 1, *b* — нет.

Большинство снимков макроструктур, приведенных выше, фиксируют завершающие стадии схождения оболочек. Сопоставив рис. 1, *b*, 2, *a*, 4, *a*, 5, *a* и 6, *a*, 6, *b*, можно сделать вывод, что неустойчивость на внутренней поверхности происходит всегда, независимо от размера оболочек и их материала. В случае малой медной оболочки движение внутреннего кольца полностью неустойчиво, отколовшаяся часть оболочки комкается. В средних медных оболочках картина течений похожа на цветок, при этом в средней стальной оболочке картина менее совершенная. В большой медной

оболочке на завершающей стадии схождения (см. рис. 5,а) симметрия течения тоже нарушается, хотя произошедшие рекристаллизация и плавление с последующей кристаллизацией (см. рис. 5,б) стирают следы картины течений в центре после схождения. При этом в большой стальной оболочке эти следы фиксируются (см. рис. 6,а,б) и прослеживается их морфологическое сходство с рис. 4,б. Таким образом, ни в одной из рассмотренных нами оболочек радиальное течение не сохраняет устойчивость на завершающих стадиях схождения, вблизи оси фокусировки. Вопрос о том, почему это происходит, представляет самостоятельный интерес, однако совокупность экспериментальных данных по оболочкам различных размеров, изготовленных из существенно различающихся по механическим свойствам материалов (сталь и медь), позволяет предположить нарушение устойчивости вблизи оси фокусировки независимо от условий эксперимента и свойств материала.

Отметим, что размер зоны неустойчивого течения в центре больших оболочек меньше, чем в средних. В большой медной оболочке этот размер меньше зоны рекристаллизации на рис. 5,б, которая, в свою очередь, меньше цветка на рис. 2,б. В большой стальной оболочке зона неустойчивости (см. рис. 6,б) существенно меньше соответствующей зоны оболочки, ограниченной отколом (см. рис. 4). Сопоставив этот факт с тем, что движение оболочек большего размера более устойчиво, можно предположить, что устойчивость радиального течения внешней и средней зон оболочки сдерживает развитие неустойчивости на внутренней поверхности на завершающих стадиях схождения.

Обсудим результаты макро- и микро-структурного исследования деформационных механизмов схождения внешних зон оболочек. Как отмечалось выше, в ряде случаев имеет место организованная локализованная деформация, которая заключается в том, что изменение конфигурации оболочки (уменьшение ее диаметра и увеличение толщины стенки) при схождении осуществляется посредством циклически появляющихся и закономерно расположенных областей локализованной деформации характерных размеров и конфигурации, которые можно назвать структурными элементами. В большой стальной оболочке структурные элементы локализованной деформации в

поперечном сечении представляют собой треугольники, очерченные полосами адиабатического сдвига (см. рис. 6,в). Похожие элементы наблюдаются в средней стальной оболочке (см. рис. 4), но там форма существенно искажается. В средних медных оболочках деформация внешних зон осуществляется посредством структурных элементов, изображенных на рис. 3,а. По-существу, это те же треугольники, но вместо тонких полос адиабатического сдвига, которые не возникают в меди из-за высокой пластичности и теплопроводности, деформация сдвига осуществляется посредством широких и размытых полос локализованного сдвига. Как следствие, наряду со сдвиговой появляется изгибная составляющая деформации. При этом внешние, обращенные к наружной поверхности оболочки, стороны треугольников изгибаются, образуя округлые выступы на поверхности оболочки. В малой медной оболочке деформация изгиба начинает преобладать и цепочки треугольников «вырождаются» в волны (см. рис. 1,б).

Интересно, что описанные выше структурные элементы имеют приблизительно одинаковые характерные размеры $3 \div 5$ мм (см. рис. 1,б, 2, 4, 6). Различие размеров этих элементов существенно меньше, чем различие размеров оболочек и значений прочностных характеристик исследованных оболочек. Это означает, что размеры структурных элементов организованной локализованной деформации слабо зависят от размеров оболочек и прочностных свойств нагружаемого материала. При этом в случае малых и средних оболочек локализованная деформация приводит к потере устойчивости, а в случае больших оболочек — нет. Основываясь на этих наблюдениях, логично в качестве феноменологического критерия неустойчивости радиального течения использовать отношение размера структурного элемента локализованной деформации ($3 \div 5$ мм) к радиусу оболочки ($12 \div 65$ мм, см. таблицу). Если это отношение мало (большие оболочки), то локализация деформации либо не происходит вообще (медь), либо приводит лишь к малым возмущениям на поверхности (сталь). Если размеры структурных элементов и радиус оболочки становятся сопоставимы (малые и средние оболочки) и их отношение достигает некоторой критической величины, происходят нарушение радиального течения, искажение формы и потеря устойчивости.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что неустойчивость радиального схождения исследованных цилиндрических оболочек под действием скользящей детонации определяется абсолютным размером оболочки, а не отношением ее толщины к радиусу, т. е. закон подобия в случае инерционного схождения данных оболочек не выполняется.

2. Установлено, что деформация на внутренней и внешней поверхностях исследованных оболочек осуществляется независимо. При этом нарушение устойчивости на внутренней поверхности имеет место всегда, вне зависимости от условий эксперимента и свойств материала, в то время как возмущения радиального течения и нарушение устойчивости на внешней поверхности и вблизи нее могут быть или не быть, в зависимости от свойств материала и размеров нагружаемой оболочки.

3. Показано, что нарушение устойчивости радиального течения во внешних слоях оболочки, приводящее к искажению ее цилиндрической формы, осуществляется за счет формирования характерной картины локализованной деформации, состоящей из однотипных, упорядоченно расположенных структурных элементов, размер которых слабо зависит от свойств материала и условий эксперимента.

4. Предложен феноменологический критерий устойчивого схождения: если отношение размера структурного элемента локализованной деформации к радиусу оболочки мало, то схождение устойчиво, а локализация деформации приводит лишь к малым возмущениям на поверхности и во внешних слоях оболочки; если это отношение достигает некоторого критического значения, форма оболочки искажается, а радиальное схождение становится неустойчивым.

ЛИТЕРАТУРА

1. Забабахин Е. И., Забабахин И. Е. Явления неограниченной кумуляции. — М.: Наука, 1988.
2. Иванов А. Г., Огородников В. А., Тюнькин Е. С. Поведение оболочек под действием импульсной нагрузки. Малые возмущения // ПМТФ. — 1992. — № 6. — С. 112–115.
3. 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 // Физика металлов и металловедение. — 2015. — Т. 116, № 3. — С. 300–308.
4. 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 // Физика металлов и металловедение. — 2017. — Т. 118, № 7. — С. 715–724.
5. 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 // Физика металлов и металловедение. — 2019. — Т. 120, № 4. — С. 352–359.
6. Огородников В. А. Вязкость и ее роль в динамических процессах. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012.
7. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортгов В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. — М.: Янус-К, 1996.
8. Вольмир А. С. Устойчивость упругих систем. — М.: Физматлит, 1963.
9. Аринин В. А., Бурцев В. В., Михайлов А. Л., Подурец А. М., Руднев А. В., Сырунин М. А., Терешкина И. А., Ткаченко Б. И., Ткаченко М. И., Трунин И. Р., Цой А. П., Шиберин И. В. Экспериментально-расчетное исследование квазисферического обжатия медной ампулы при нагружении ее детонацией слоя пластического ВВ // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 5. — С. 112–120.
10. Нестеренко В. Ф., Бондарь М. П. Локализация деформации при схлопывании толстостенного цилиндра // Физика горения и взрыва. — 1994. — Т. 30, № 4. — С. 99–111.
11. Рыбин В. В., Ушанова Э. А., Золоторевский Н. Ю. Особенности строения разориентированных структур в бислойной пластине медь — медь, полученной сваркой взрывом // Журн. техн. физики. — 2013. — Т. 83, вып. 9. — С. 63–72.
12. 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 // Физика металлов и металловедение. — 2018. — Т. 119, № 6. — С. 573–581.

Поступила в редакцию 29.11.2018.

После доработки 29.01.2019.

Принята к публикации 20.02.2019.