

СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ
И ДИФФУЗИЯ

УДК 669.715:539.89:539.25

СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕОЛОГИЯ СХОЖДЕНИЯ
ТОЛСТОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ Al–Mg СПЛАВА

© 2023 г. И. Г. Бродова^{а, *}, И. Г. Ширинкина^а, В. В. Астафьев^а, С. В. Балушкин^б,
Г. В. Куликов^б, А. Ю. Симонов^б

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

^бФГУП “РФЯЦ–ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина”,
ул. Васильева, 13, а/я 245, Снежинск, Челябинская обл., 456770 Россия

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

Поступила в редакцию 18.07.2023 г.

После доработки 17.08.2023 г.

Принята к публикации 03.09.2023 г.

Рассмотрено деформационное поведение толстостенных полых цилиндрических оболочек из сплава АМг6 (Al–6.1% Mg–0.6% Mn–0.1% Ti–0.2% Si, мас. %), нагруженных по 8-ми точечной схеме инициирования накладного взрывчатого вещества (ВВ). Интенсивность взрывного нагружения регулировалась количеством ВВ. Установлено, что в зависимости от интенсивности воздействия и геометрических характеристик оболочек наблюдаются разные сценарии их схождения. Определены условия формирования откольных внутренних слоев, изучены эволюция структуры при высокоскоростной деформации вдоль радиуса и по длине оболочек и изменение твердости вдоль радиуса оболочек. Проведено рентгенографирование динамики процессов деформирования оболочек в разные промежутки времени. Определены скорости движения наружных и внутренних слоев оболочек и скорости их деформации при разном количестве ВВ.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, оболочки, ударная волна, структура, микротвердость, упрочнение, рентгенографирование

DOI: 10.31857/S0015323023601332, **EDN:** CQRLKM

ВВЕДЕНИЕ

Исследование процесса схождения цилиндрических оболочек в условиях ударно-волнового нагружения является одним из активно развиваемых направлений физики ударных волн, позволяющих тестировать модели сдвиговой и откольной прочности металлических материалов [1–3], устанавливать зависимости между параметрами нагружения оболочек и их механическими свойствами [4, 5], изучать взаимосвязь между характеристиками ударно-волнового воздействия и особенностями высокоскоростного деформирования металлов и сплавов [6–8] и т.д.

Удобными модельными материалами для изучения особенностей деформирования под действием сжимающих ударно-волновых нагрузок являются алюминиевые сплавы [9, 10]. В частности, на примере изучения эволюции структуры цилиндрических оболочек из сплавов АМц (Al–Mn) и Д16 (Al–Cu–Mg), нагруженных методом скользящей детонации, показана связь между длительностью импульса ударной волны и реологией схождения оболочек [9]. Обнаружена зависимость полноты схождения под действием инерционно-

го высокоскоростного сжатия и чередования сформировавшихся структурных зон от состава сплава и его механических свойств. Например, при одинаковых условиях нагружения в оболочке из сплава Д16 формируются множественные отколы, она не сохраняет свою форму и разлетается на фрагменты, а оболочка из сплава АМц равномерно схлопывается в цилиндр. Известно, что при взрывном нагружении в оболочках могут образовываться множественные откольные разрушения [6, 9, 10–12]. Так, в [10] рассмотрены условия формирования отколов в тонкостенной оболочке из сплава АМг6 (Al–Mg), нагруженной методом скользящей детонации, в зависимости от интенсивности детонационной волны. Обнаружены морфологические и размерные отличия структурных составляющих в зонах откола.

Среди массива данных по физике ударных волн можно выделить экспериментальные работы, в которых процесс схлопывания непосредственно регистрируется с помощью методики импульсного многокадрового рентгенографирования или протонографирования [1, 2, 5, 13]. Они позволяют наглядно представить динамику сжог-

Таблица 1. Условия нагружения оболочек

№ оболочек	Толщина ВВ, мм	Тип и толщина прокладки, мм	Длина оболочек, мм
I	4	Бумага, 6	500
II	3	Песок + пластик, (5 + 2)	500
III	5	Пластик + песок + пластик, (1.5 + 7 + 1.5)	250

дения оболочек (шаров) и связать ее с эволюцией структурных и фазовых превращений при ударно-волновом нагружении. К настоящему времени таких работ явно недостаточно из-за нехватки уникального оборудования.

Цель данной работы – изучение динамики схождения полых цилиндрических оболочек из Al–Mg сплава АМг6 методом импульсной рентгенографии и исследование взаимосвязи структуры с параметрами ударно-волнового нагружения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Цилиндрические оболочки из сплава АМг6 (Al–6.1% Mg–0.6% Mn–0.1% Ti–0.2% Si, мас. %) с внешним диаметром 60 мм, толщиной стенки 8 мм и длиной 500 и 250 мм нагружали методом детонации равномерно расположенного на наруж-

ной поверхности оболочки накладного взрывчатого вещества (ВВ), инициированного в 8 точках. Интенсивность взрывного нагружения регулировалась толщиной ВВ и наличием прокладок, образующих защитный слой на наружной поверхности оболочек, который сглаживал форму ударного импульса и снижал величину давления. Условия нагружения оболочек приведены в табл. 1.

Выполнены структурные исследования продольных и поперечных сечений оболочек с помощью светового микроскопа “Neophot-32”. Аттестацию свойств нагруженных оболочек проводили путем измерения микротвердости основы сплава – Al-твердого раствора. Микротвердость H_v измеряли на приборе “ПМТ-3” при нагрузке 0.2–0.5 Н (погрешность не превышала 5%).

Для изучения динамики схождения длинных оболочек использовали экспериментальный комплекс, включающий две импульсные рентгеновские установки, расположенные таким образом, чтобы направления пучков их рентгеновского излучения располагались под углом 90° , а пересечение пучков находилось на оси исследуемой оболочки. Применение независимых рентгеновских установок позволяет зафиксировать эволюцию состояния нагружаемой оболочки на значительно отличающихся стадиях (радиусах схождения), благодаря возможности значительно и независимо разнести моменты регистрации. Динамику схождения короткой оболочки определяли по результатам высокоскоростной видеорегистрации со скоростью 461 000 кадров в секунду с промежутками между кадрами 2.1 мкс.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгенографические изображения длинных оболочек, полученные в разные моменты взрывного эксперимента, показаны на рис. 1, 2. Время съемки составило $t_1 = 37$ мкс и $t_2 = 47$ мкс (оболочка I) и $t_1 = 48$ мкс и $t_2 = 70$ мкс (оболочка II). В результате обмера рентгенограмм получены экспериментальные данные о перемещении внешних и внутренних границ (радиусов), охватывающие временной интервал 10 мкс для оболочки I и 22 мкс для оболочки II. Значения радиусов оболочек в разные моменты времени приведены в табл. 2.

Зная, как меняются значения внутреннего радиуса по мере схождения оболочки за время съем-

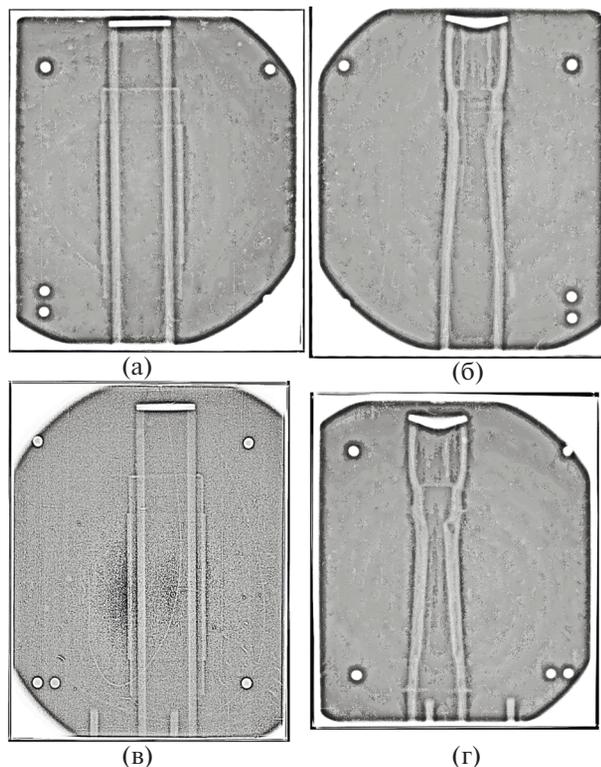


Рис. 1. Рентгеновское изображение оболочки I в разные моменты времени: а, в – предварительный кадр; б – $t_1 = 37$ мкс; г – $t_2 = 47$ мкс.

ки, можно посчитать истинную деформацию e для наружных слоев оболочки, расположенных на внутренних радиусах до $R_2 = 10.9\text{--}7.3$ мм.

$e = \ln r_0/R_2$, где r_0 – начальный внутренний радиус.

Так, если для оболочки I деформация на начальном этапе схождения в течение 47–48 мкс равна $e = 0.69$, то для оболочки II за это же время $e = 0.24$, т.е. в 2.9 раза меньше. Если считать, что схождение оболочки по радиусу равномерное, то центральные слои, расположенные на $R_2 = 2\text{--}1$ мм, претерпевают на конечном этапе схождения истинную деформацию $e = 2.4\text{--}3.1$.

Исходя из данных табл. 2, были посчитаны средние скорости схождения оболочек на разных радиусах (табл. 3).

Зная среднюю скорость схождения V_2 и начальный внутренний радиус оболочки $r_0 = 22$ мм, можно определить скорость деформации $\dot{\epsilon} = \frac{V_2}{r_0}$.

Из данных табл. 3 видно, что при всех режимах нагружения материал оболочки подвергается интенсивной деформации со скоростью порядка 10^4 с⁻¹ уже на начальных этапах схождения. Разница скоростей деформации незначительная, в пределах одного порядка, тем не менее скорость деформации оболочки I, нагруженной при толщине слоя ВВ $h = 4$ мм, выше.

На рис. 3 приведены результаты высокоскоростной видеорегистрации динамики схождения III оболочки, а именно, временные зависимости скорости движения внутреннего радиуса оболочки (рис. 3а) и его величины (рис. 3б). Анализируя эти данные, можно отметить немонотонный характер изменения скорости схождения: резкое увеличение до 950 м/с в начальный момент времени (до 2 мкс) и постепенное затухание от 650 до

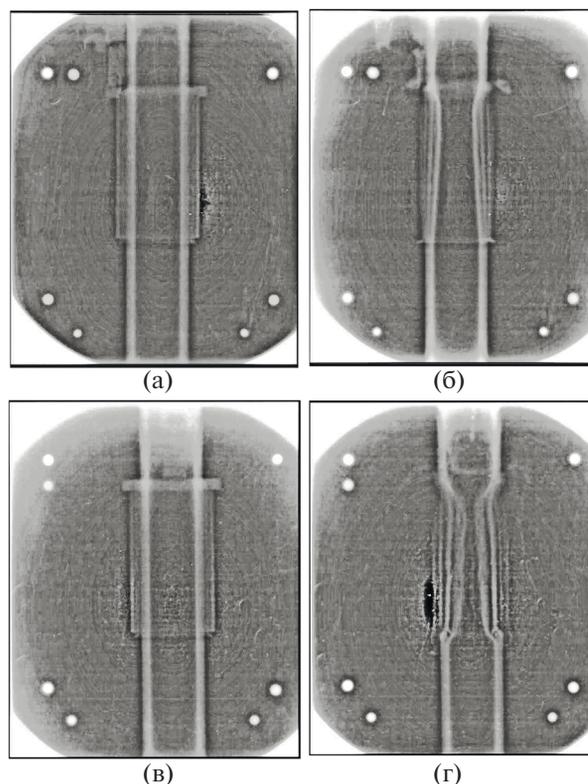


Рис. 2. Рентгеновское изображение оболочки II в разные моменты времени: а, в – предварительный кадр; б – $t_1 = 48$ мкс; г – $t_2 = 70$ мкс.

550 м/с в следующие 5–25 мкс, а также уменьшение внутреннего радиуса с 22 до 5 мм за полное время схождения 25 мкс.

Чтобы определить влияние условий нагружения на изменение морфологии и структуры наружных и внутренних слоев длинных оболочек, проведены сравнительные металлографические

Таблица 2. Радиусы длинных оболочек в разные моменты времени

Время, мкс	37		47		48		70	
	внешн., R_1 , мм	внутр., R_2 , мм	внешн., R_1 , мм	внутр., R_2 , мм	внешн., R_1 , мм	внутр., R_2 , мм	внешн., R_1 , мм	внутр., R_2 , мм
I	28	18	23.3	10.9				
II					27.3	17.2	25	7.3

Таблица 3. Средняя скорость схождения длинных оболочек и скорость деформации их внутренних слоев

№ оболочки	Средняя скорость схождения, м/с		Скорость деформации 10^3 , с ⁻¹
	внешний радиус, V_1	внутренний радиус, V_2	
I	470	710	32.3
II	213	450	20.5

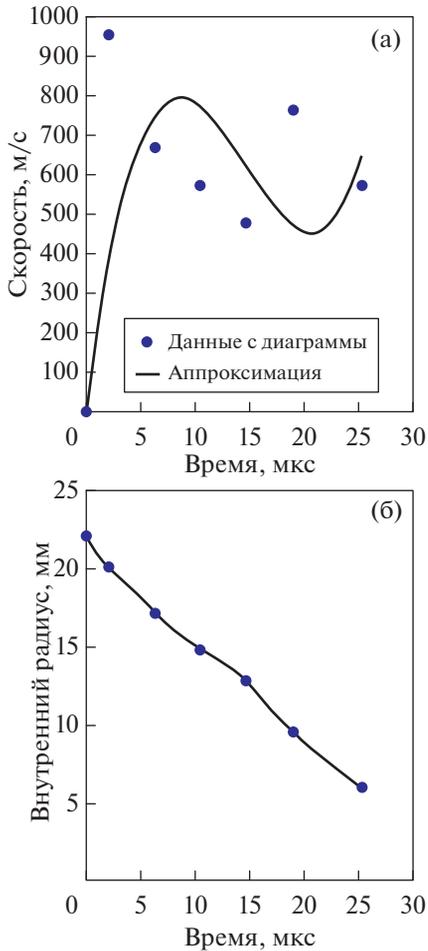


Рис. 3. Временные зависимости параметров движения внутреннего радиуса оболочки III: а – скорость; б – внутренний радиус.

исследования внешних поверхностей оболочек и их поперечных и продольных сечений.

Внешний вид оболочек I и II показан на рис. 4а–4г. На внешней поверхности обеих оболочек (рис. 4а–4в) наблюдаются широкие сдвиговые полосы и трещины, глубина которых возрастает с ростом интенсивности нагрузки. В начале схождения на внутренней поверхности оболочек образуются “ребра”, обусловленные столкновением ударных волн от соседних точек инициирования при 8-ми точечной схеме нагружения, которые отчетливо видны с торцов (рис. 4б, 4г). На конечном этапе схождения внешняя поверхность оболочек становится более дефектной, а продольные трещины наблюдаются по всей толщине и выходят на внутреннюю поверхность. Сравнение рис. 4а и 4в наглядно показывает, что количество и протяженность сдвиговых полос в оболочке I, нагруженной более толстым слоем ВВ ($h_{ВВ} = 4$ мм), больше, чем в оболочке II ($h_{ВВ} = 3$ мм).

На продольном и поперечном сечениях оболочки I выявляются сдвиговые полосы, несимметричность расположения которых свидетельствует о неустойчивости схождения оболочки по радиусу и по длине (рис. 5а, 5б). Следы множественной деформации и трещины показаны на поперечном сечении (рис. 5б).

На продольном сечении видно, что при взрывном нагружении, в результате наложения волн разрежения и возникновения растягивающих напряжений, на внутренней поверхности оболочки образуется откольный слой (рис. 5а). Он представляет собой слоистый конгломерат застывших струй расплава, что свидетельствует о локальном



Рис. 4. Внешний вид длинных оболочек I (а, б) и II (в, г) после нагружения: а, в – боковая поверхность; б, г – торец.

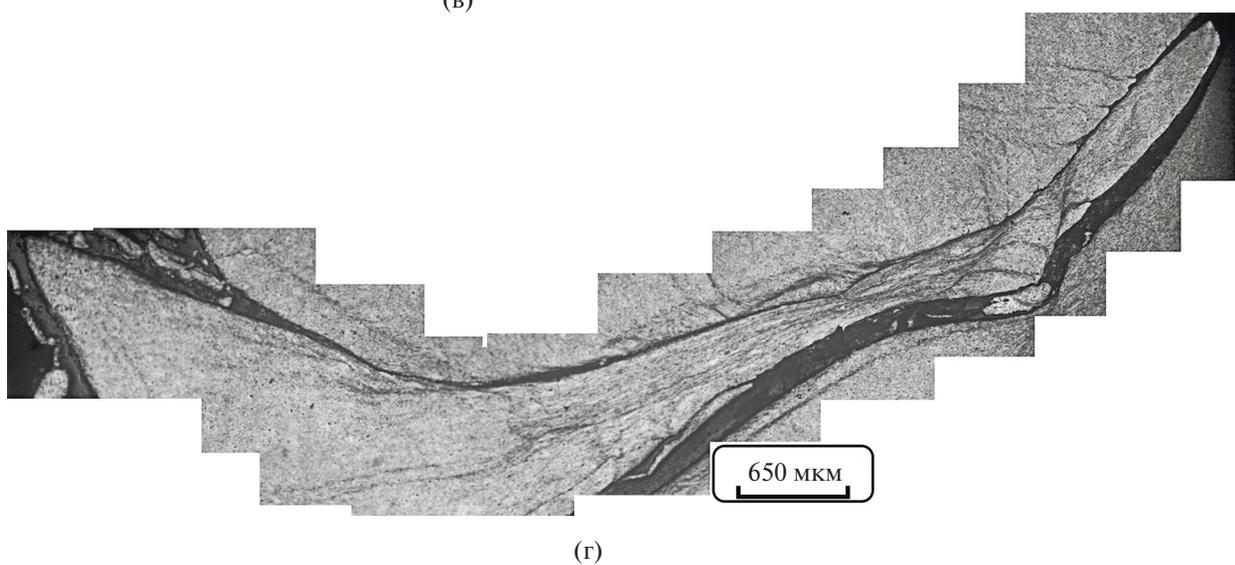
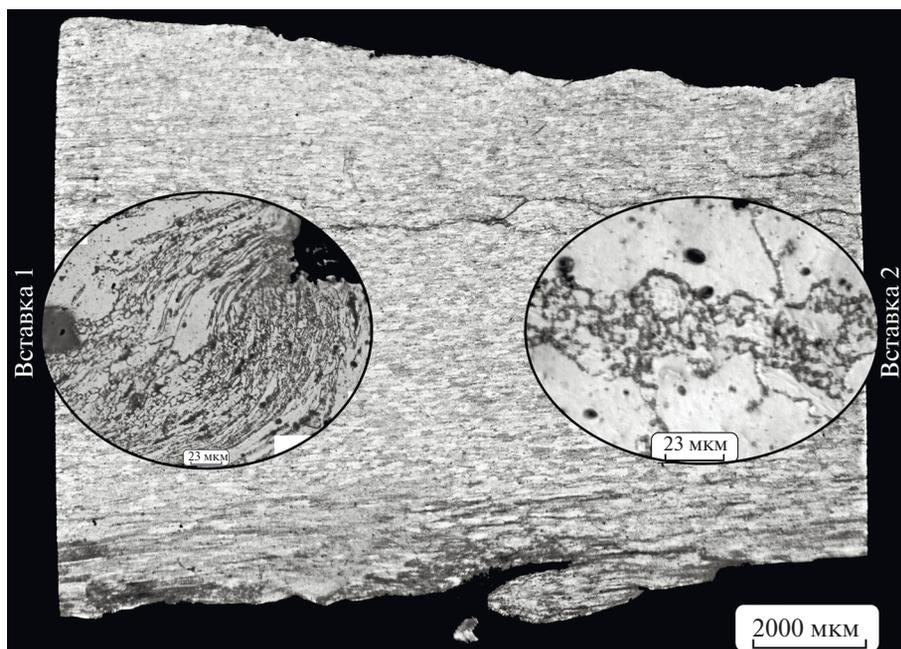
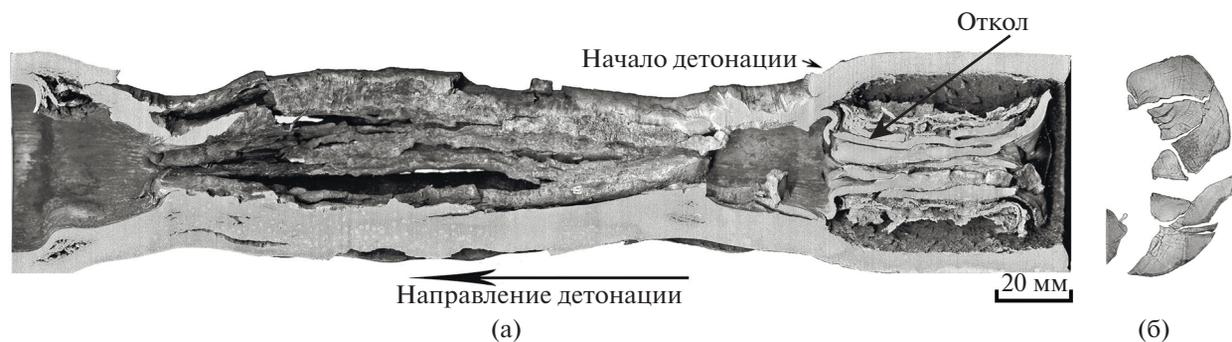


Рис. 5. Структура оболочки I: а – продольное сечение; б – поперечное сечение на половине длины оболочки; в – волокна с участками вихревого течения (вставка 1) и зоной разнорзернистости (вставка 2); г – зона локализованной деформации.

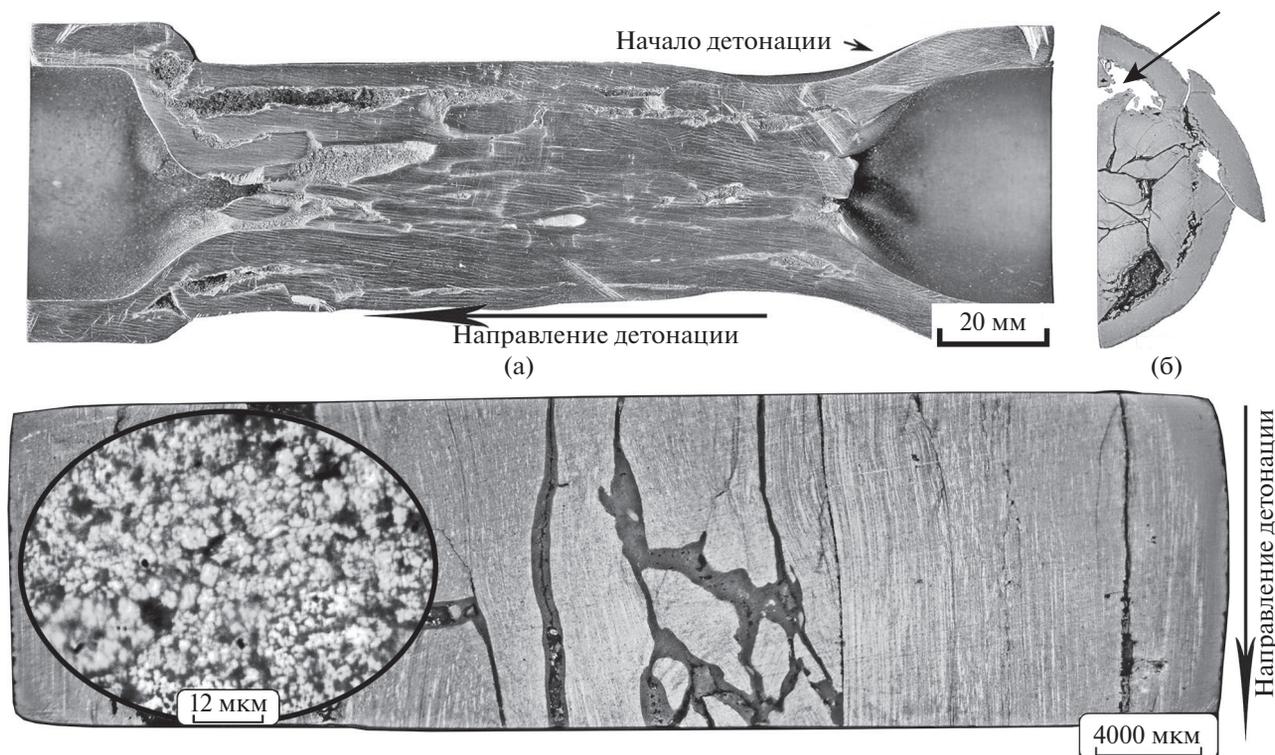


Рис. 6. Структура оболочки II: а – продольное сечение; б – поперечное сечение на половине длины оболочки; в – зона равноосных зерен внутри волокна.

повышении температуры, плавлении и последующей кристаллизации отколовшейся внутренней части оболочки. Наличие такого откола показано также на рентгеновских изображениях этой оболочки при схождении во временном интервале 37–47 мкс (рис. 1б, 1г).

В основном, оболочка имеет полосовую макроструктуру, образованную волокнами разной толщины (рис. 5в) с участками вихревого течения (вставка 1). Внутри волокон формируется неоднородная микроструктура, состоящая из мелких (5 мкм) и крупных (более 30 мкм) зерен (вставка 2, рис. 5в). Такая особенность структурообразования на мезоуровне связана с чередованием полос сильной и слабой деформации, которое является неотъемлемым признаком высокоскоростного нагружения. Еще одним признаком структурообразования при ударно-волновом нагружении являются зоны локализованной деформации, возникающие в следствии потери устойчивости фронта ударной волны [8]. Пример такой зоны с образованием пластических “струй” в оболочке I показан на рис. 5г.

После нагружения продольное сечение оболочки принимает форму выпуклой линзы переменного радиуса, т.е. вероятно, после схлопывания оболочка незначительно разошлась, но не разлетелась на фрагменты, а сохранила форму цилиндра.

Схождение оболочки II проходило по другому сценарию. Согласно рис. 6а, 6б, произошло полное схлопывание оболочки в цилиндр диаметром 40 мм.

Согласно данным, полученным при регистрации динамики схождения этой оболочки (рис. 2а–2г), в момент времени $t = 48$ мкс зафиксирован откольный слой, который сохраняет свои размеры и форму при $t = 70$ мкс. Внутренние дефекты откольного слоя наглядно демонстрируются на поперечном сечении нагруженной части оболочки II (рис. 6б). В основном это откольные фрагменты с частично залеченными и незалеченными многочисленными трещинами. Вдоль окружности, представляющей собой поверхность откола, на расстоянии ~ 3 мм от наружной поверхности, находятся наиболее крупные пустоты, сформировавшиеся после слияния цепочки пор откольного происхождения. Далее осесимметричное схождение нарушается, и возникает система хаотически направленных трещин. По мере схождения откольный слой фрагментируется и компактируется в центре. Следовательно, сценарий схождения оболочки II – полное схлопывание полой оболочки в цилиндр с дроблением центрального слоя. На рис. 6в показана макроструктура продольного сечения оболочки II. Она является типичной для высокоскоростной деформации Al-сплавов и состоит из волокон разной толщины и

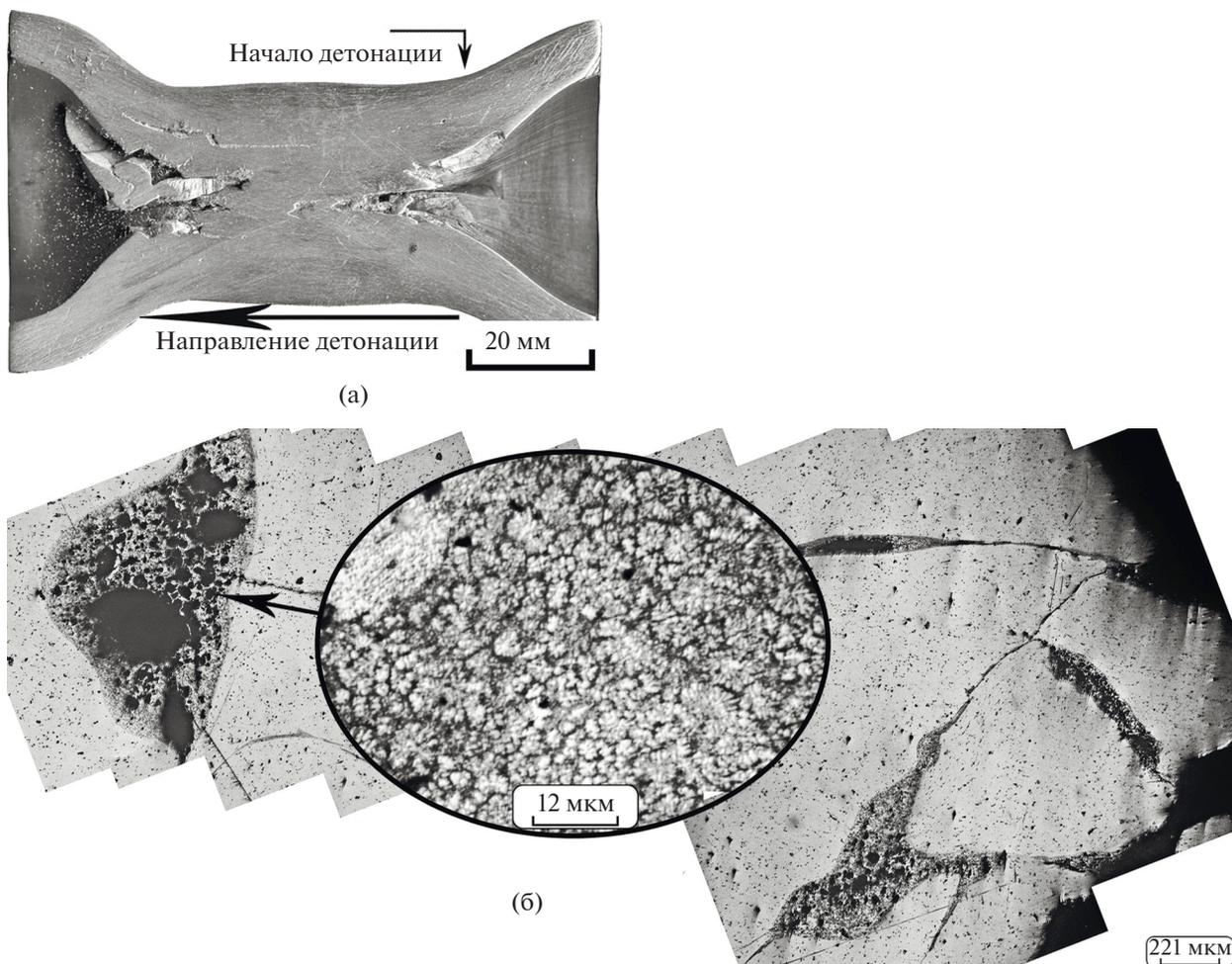


Рис. 7. Структура оболочки III: а – продольное сечение; б – центральная зона с дендритной структурой.

участков вихревого течения. Волокна сформированы достаточно равномерной равноосной структурой с размером зерен ~ 10 мкм (вставка, рис. 6в). Морфология зерен, разделенных большеугловыми границами, вероятно, свидетельствует о протекании динамической рекристаллизации в процессе высокотемпературной деформации при инерционном сжатии оболочки.

Реология сжатия зависит не только от интенсивности нагрузки, но и от геометрических характеристик оболочки, например, ее длины, что иллюстрирует рис. 7. Согласно рис. 7а, при сжатии короткой оболочки III наблюдаются протяженный по длине участок полного сжатия и небольшой фрагмент, отколовшийся в ее нижней части. Отколовших повреждений, в отличие от длинных оболочек, не обнаружено. По всей длине оболочки формируется деформированная волокнистая без вихревых зон структура, аналогичная той, что наблюдается в оболочке II.

В центре оболочки находятся локальные зоны (отмечены стрелкой на рис. 7б) с литой сфероли-

топодобной дендритной структурой и размером зерен ~ 5 мкм (вставка, рис. 7б). Наличие таких зон свидетельствует о том, что в процессе сжатия оболочка нагревалась до температур, превышающих температуру плавления сплава 650°C , а дендритный характер затвердевания обусловлен высоким температурным градиентом и высокой скоростью кристаллизации расплава. Присутствующие в этой области трещины полностью или частично залечены. Описанная реология сжатия подтверждается данными высокоскоростной видеорегистрации (рис. 3).

Отмеченные различия структуры длинных оболочек также проявились при измерении их твердости (рис. 8). Анализируя эти данные, можно заключить, что независимо от режимов нагружения, материал упрочняется относительно репера (твердости сплава до нагружения $H_v = 800$ МПа) на 200–300 МПа. Твердость оболочки I ниже, чем твердость оболочки II, на 100–130 МПа. Если не учитывать отличия прокладок (см. табл. 1), то увеличение количества ВВ снижает твердость

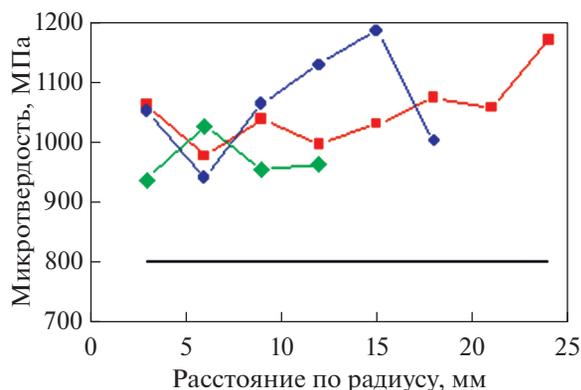


Рис. 8. Изменение микротвердости по радиусу оболочки: ● — III; ■ — II; ◆ — I; — — репер.

длинных оболочек. Возможной причиной такого изменения твердости является релаксация напряжений за счет интенсивного разогрева материала в условиях более мощного взрывного эксперимента.

При сравнении изменения микротвердости по радиусу схлопнувшейся короткой оболочки III и микротвердости длинных оболочек I и II, можно отметить, что на фоне равномерного изменения твердости оболочки II, твердость оболочки III меняется немонотонно и уменьшается от 1100–1200 до 900 МПа в областях, примыкающих к центральной зоне.

Достаточно сильное упрочнение оболочки III относительно репера (350–400 МПа) свидетельствует о наклепе материала в процессе высокоскоростной деформации и отсутствии динамического возврата, приводящего к снижению напряжений в материале и снижению его твердости. В центре оболочки, в области литой мелкодисперсной структуры твердость снижается, но остается выше твердости репера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы особенности структурообразования при сжатии толстых оболочек из сплава АМгб в зависимости от интенсивности нагружения и их длины. Проведено рентгенографирование динамики процесса сжатия, определены скорости сжатия, скорости деформации и истинная деформация внутренних слоев оболочек в зависимости от интенсивности нагружения. Установлены разные сценарии сжатия оболочек длиной 500 мм: при менее интенсивной нагрузке — оболочка сошла с образованием скомпактированного внутреннего откольного слоя; при более интенсивной нагрузке — оболочка схлопнулась, а потом разошлась, но сохранила форму цилиндра. Показано, что уменьшение длины оболочки в два раза влияет на реологию сжатия. Подобран

режим полного и устойчивого сжатия оболочек длиной 250 мм.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБНАУКИ России (тема “Структура”, № 122021000033-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аринин В.А., Буцнев В.В., Михайлов А.Л., Подурец А.М., Руднев А.В., Сырунин М.А., Терешкина И.А., Ткаченко Б.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.
2. Козлов Е.А., Бричков С.А., Боярников Д.С., Кучко Д.П., Дегтярев А.А. Особенности динамики сжатия стальных оболочек при их взрывном нагружении по результатам лазерно-интерферометрических измерений // *ФММ*. 2011. Т. 112. № 4. С. 412–428.
3. Аношин М.А., Габзетдинова Л.Я., Козлов Е.А., Куратов С.Е., Ольхов О.В., Соколов С.С., Таржанов В.И., Шувалова Е.В. Численное моделирование процессов разрушения в экспериментах с обжимаемыми оболочками // *Деформация и разрушение материалов*. 2011. № 3. С. 23–27.
4. Каннель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортков В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 407 с.
5. Матюшкин Н.И., Тришин Ю.А. О некоторых эффектах, возникающих при взрывном обжатии вязкой цилиндрической оболочки // *Прикладная механика и техническая физика*. 1978. № 3. С. 99–112.
6. 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.
7. 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 сжатии цилиндрических оболочек // *ФММ*. 2019. Т. 120. № 4. С. 381–388.
8. Беликова А.Ф., Бураваева С.Н., Гордолопов Ю.А. Локализация деформации и связь ее с деформированным состоянием материала // *Журн. технич. физики*. 2013. Т. 83. Вып. 2. С. 153–155.
9. Коваль А.В., Ширинкина И.Г., Петрова А.Н., Бродова И.Г., Смирнов Е.Б., Шорохов Е.В. Структурные превращения в алюминиевых цилиндрических оболочках при динамическом нагружении // *Физика горения и взрыва*. 2019. Т. 55. С. 82–91.
10. Бродова И.Г., Смирнов Е.Б., Ширинкина И.Г., Астафьев В.В., Яблонских Т.И., Коваль А.В., Дегтярев А.А., Шорохов Е.В. Изменение структуры и свойств цилиндрических оболочек из сплава АМгб при нагружении скользящими детонационными волнами // *Деформация и разрушение материалов*. 2018. № 1. С. 17–22.
11. Козлов Е.А., Бричков С.А., Вильданов В.Г., Горбачев Д.М., Юсупов Д.Т. Откольные и сдвиговые

- разрушения в сферически сходящихся оболочках из железа и сталей. Измерения энергий и остаточных деформаций // Деформация и разрушение материалов. 2008. № 11. С. 2–10.
12. Козлов Е.А., Коваленко Г.В., Литвинов Б.В., Уваров А.И., Теплов В.А. Особенности деформации и разрушения аустенитной стали 60ХЗГ8Н8Ф в сферических волнах напряжений // ДАН. 1998. Т. 358. № 2. С. 189–192.
13. Экспериментальные методы и средства в физике экстремальных состояний вещества: монография / Под ред. академика Р.И. Ильяева, д.т.н. А.Л. Михайлова, д.ф.-м.н. М.В. Жерноклетова. М.: РАН, 2021. 484 с.

Structural Investigations and Rheology of Convergence of Thick-Wall Shells from Al–Mg Alloy

I. G. Brodova^{1,*}, I. G. Shirinkina¹, V. V. Astafiev¹, S. V. Balushkin², G. V. Kulikov², and A. Y. Simonov²

¹Miheev Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620108 Russia

²Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All – Russia Research Institute of technical Physics”, Snezhinsk, Chelyabinsk region, 456770 Russia

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

Abstract—The deformation behavior of thick-walled hollow cylindrical shells made of the AMg6 alloy (Al–6.1% Mg–0.6% Mn–0.1% Ti–0.2% Si, wt %) loaded according to an 8-point initiation scheme of an attached explosive is considered. The intensity of explosive loading was regulated by the amount of explosives. It has been established that, different scenarios for their convergence are observed depending on the intensity of the impact and the geometric characteristics of the shells. The conditions for the formation of spallation internal layers were determined, the evolution of the structure during high-speed deformation along the radius and along the length of the shells and the change in hardness along the radius of the shells were studied. X-ray photography of the dynamics of shell deformation processes was carried out at different time intervals. The speeds of movement of the outer and inner layers of the shells and the speed of their deformation for different amounts of explosives were determined.

Keywords: aluminum alloy, shells, shock wave, structure, microhardness, hardening, radiography