



*Институт физики металлов им. М.Н. Михеева  
Уральского отделения РАН*

1

## СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕОЛОГИЯ СХОЖДЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ОБОЛОЧЕК

*И.Г. Бродова<sup>1</sup>, В.В. Астафьев<sup>1</sup> И.Г. Ширинкина<sup>1</sup>,  
С.В.Балушкин<sup>2</sup>, А.Ю.Симанов<sup>2</sup>, В.И. Куликов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Институт физики металлов УрО РАН имени М.Н. Михеева, Россия, г.  
Екатеринбург

<sup>2</sup> РФЯЦ-ВНИИТФ, Россия, г. Снежинск

[brodova@imp.uran.ru](mailto:brodova@imp.uran.ru)

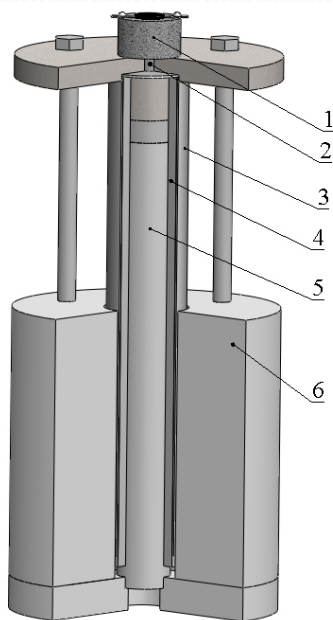
Ударно-волновое нагружение дает возможность исследовать поведение металлов и сплавов в экстремальных условиях. На основании изучения эволюции структуры сплавов можно прогнозировать пластические и прочностные свойства, а также выявить механизмы упрочнения материалов

Целью данной работы является исследование влияние условий нагружения при схлопывании полых цилиндрических оболочек из сплава АМгб на их структуру и свойства.

Изучение особенностей схождения оболочек позволяет исследовать процессы кумуляции ударной волны и высокоскоростной деформации материала.

# Схема экспериментального узла и материал

Ударная сжимаемость материала зависит от его прочностных свойств. Широкую палитру Al сплавов использовали как удобную модель для изучения откольных явлений в лёгких сплавах. - ЗНЧ-2019.



1. Электроретонатор;
2. Система кольцевого инициирования из ВВ
3. Пластичное ВВ,  $h = 1\text{ мм}$ ;
4. Слой из конденсаторной бумаги,  $h = 5\text{ мм}$ ;
5. Составная цилиндрическая оболочка толщиной  $h = 2\text{ мм}$ ;
6. Стальной корпус,  $h=50\text{ мм}$ .

Скорость детонации 7,8 км/с.

Механические свойства оболочек в состоянии поставки

Материал Оболочки	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_t$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\varphi$ , %
АМц	130	50	20	70
Д16	210	110	18	55
АМг 6	340	170	20	38

Нагружение методом скользящей детонации при инициировании накладного заряда ВВ. Две серии экспериментов.

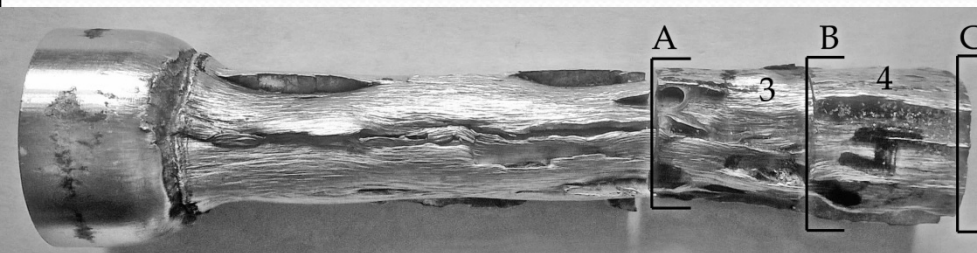
## ***I серия – Влияние длительности импульса ударной волны.***

Составная цилиндрическая оболочка, одна часть которой находилась в стальном корпусе. Остальные параметры нагружения одинаковые (сплавы Д16 и АМц).

***II серия – Влияние интенсивности воздействия (толщина ВВ  $h=0.5$ ,  $h=1$  мм)*** Сплошная цилиндрическая оболочка, нагружение без корпуса (сплав АМг6).

# Оболочка из сплава АМг 6

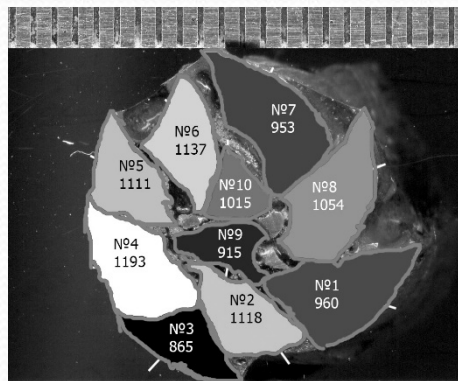
Нагружение методом скользящей детонации при инициировании накладного заряда ВВ.  
 $h=1\text{ мм}$ ,  $r=12\text{ мм}$ ,  $t=2$ ,  $t/r=0.17$



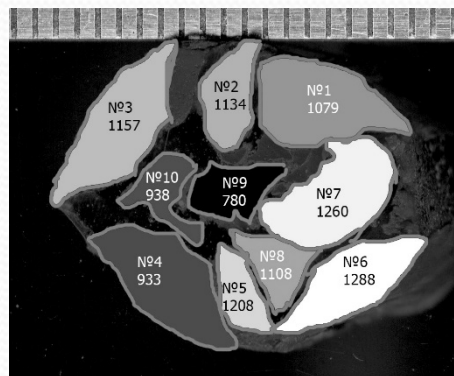
Деформация в радиальном и в осевом направлениях неравномерная. Дефектность внешней поверхности на конечном этапе схождения оболочки возрастает.

После схождения происходит разлёт оболочки на фрагменты разного размера и формы.

При наложении откольных явлений и высокоскоростной деформации схлопывания осуществлялся перенос материала вдоль оси оболочки и разворот фрагментов при разлёте.



поперечное сечение 3А;



поперечное сечение 4С.

Форма, площадь и твёрдость фрагментов в двух сечениях по длине оболочки разные. В центральной зоне находятся фрагменты с разной твёрдостью:  $Hv=780$  и  $1015$  МПа.

# Толстостенные оболочки из сплава АМг 6

Нагружение методом детонации накладного заряда ВВ разной толщины, расположенного в 8 точках по окружности поверхности оболочек. Размеры оболочек:  $r=30$  мм,  $t=8$  мм,  $t/r=0.27$ , высота 500 мм



На внешней поверхности наблюдаются широкие сдвиговые полосы и трещины, глубина которых зависит от интенсивности нагрузки.

## Оболочка II

$h$  ВВ= 4 мм + прокладка- бумага (6 мм)



Деформация в радиальном и в осевом направлениях неравномерная. Дефектность внешней поверхности на конечном этапе схождения оболочки II возрастает, а оболочки III уменьшается

## Оболочка III

$h$  ВВ =3 мм + прокладка - песок+пластик ( 5+2 мм )

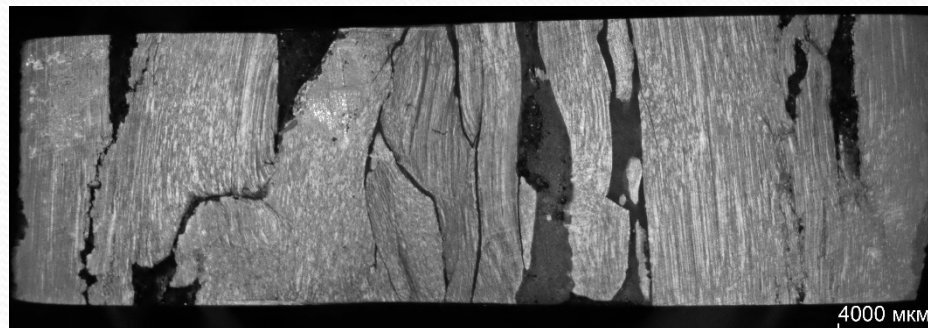
Вначале схождения на внутренней поверхности оболочки образуются рёбра, обусловленные столкновением ударных волн от соседних точек инициирования при 8-ми точечной схеме нагружения.

**Интенсивность нагрузки оболочки II > чем оболочки III**

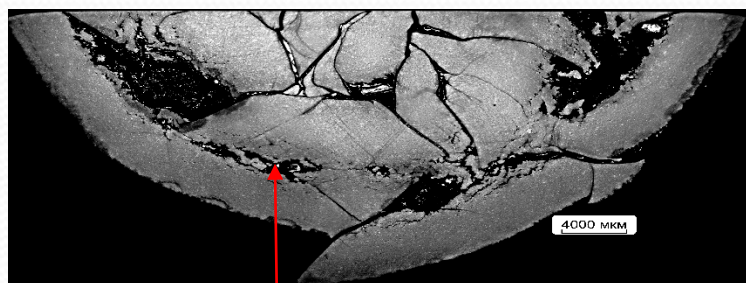
# Оболочка III (h BB=3 мм)



← Направление детонации



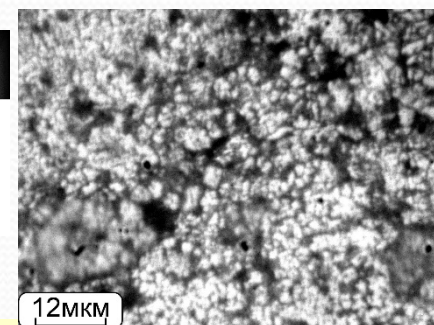
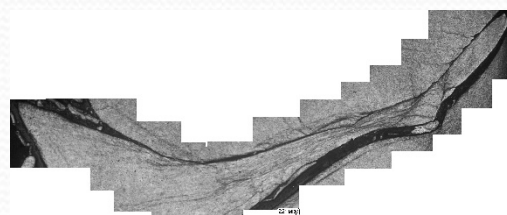
↑  
Продольное сечение - типичная для высокоскоростной деформации Al сплавов полосовая структура с участками вихревого течения



↑  
Поверхность откола на 1/2 высоты оболочки в поперечном сечении

По мере схождения откольный слой фрагментируется и компактируется в центре

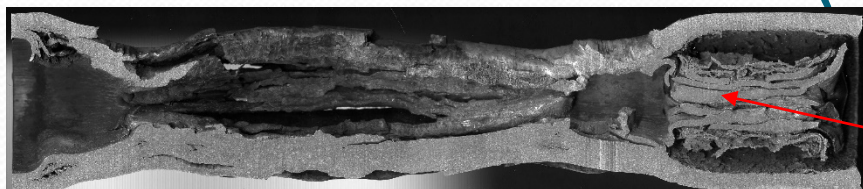
Зона локализованной деформации и образование пластических струй



Внутри полос мелкозернистая структура, образованная динамической рекристаллизацией

Сценарий схождения - полное схлопывание оболочки в цилиндр с дроблением откольного слоя.

# Оболочка II ( $h_{VV}=4 \text{ мм}$ )

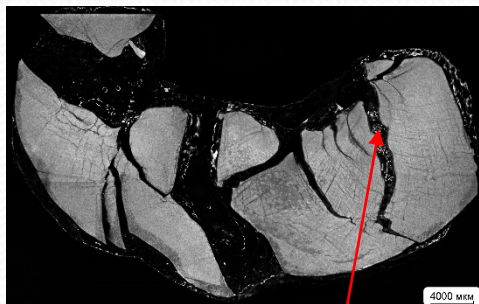


На начальной стадии схождения образовался откол

← Направление детонации  
Форма линзы, переменный радиус

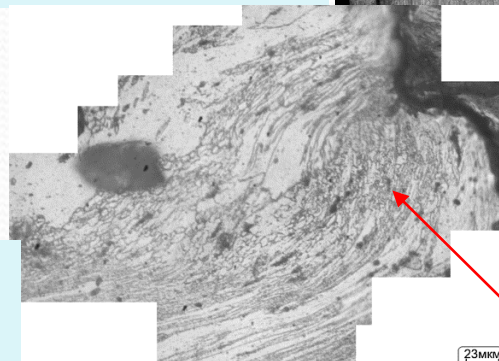
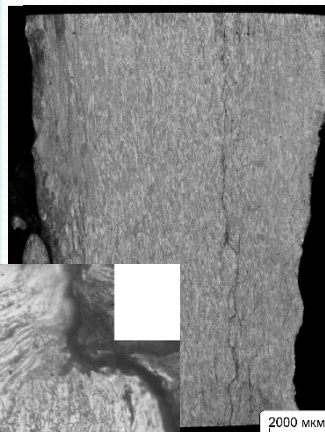
Откольный гофрированный слой представляет собой конгломерат из застывших струй расплава, что свидетельствует о плавлении центральных слоёв оболочки и их последующей кристаллизации.

Несимметричность расположения сдвиговых полос на продольном и поперечном сечениях свидетельствуют о неустойчивости схождения оболочки по радиусу и по высоте.

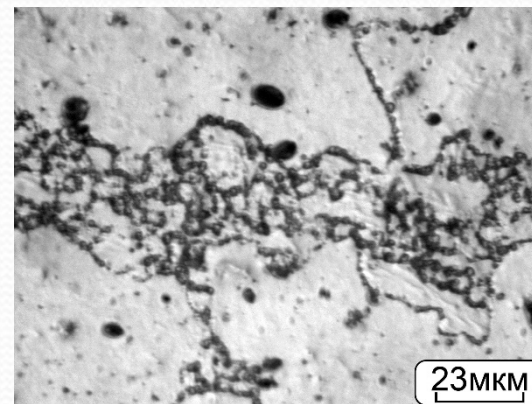


Следы множественной деформации, трещины, на  $\frac{1}{2}$  высоты

Оболочка полностью схлопнулась, а потом разошлась, но сохранила форму цилиндра



полосовая структура с участками вихревого течения



Внутри полос - неравномерная структура, состоящая из мелких и крупных зёрен. Чередование полос сильной и слабой деформации отражают особенности структурообразования на мезоуровне.

# Рентгенографирование процесса деформации оболочек

Съёмка двумя ракурсами под углом 90 градусов  
 Время съёмки 37 и 47 мкс ( оболочка II)  
 47 и 70 мкс ( оболочка III).

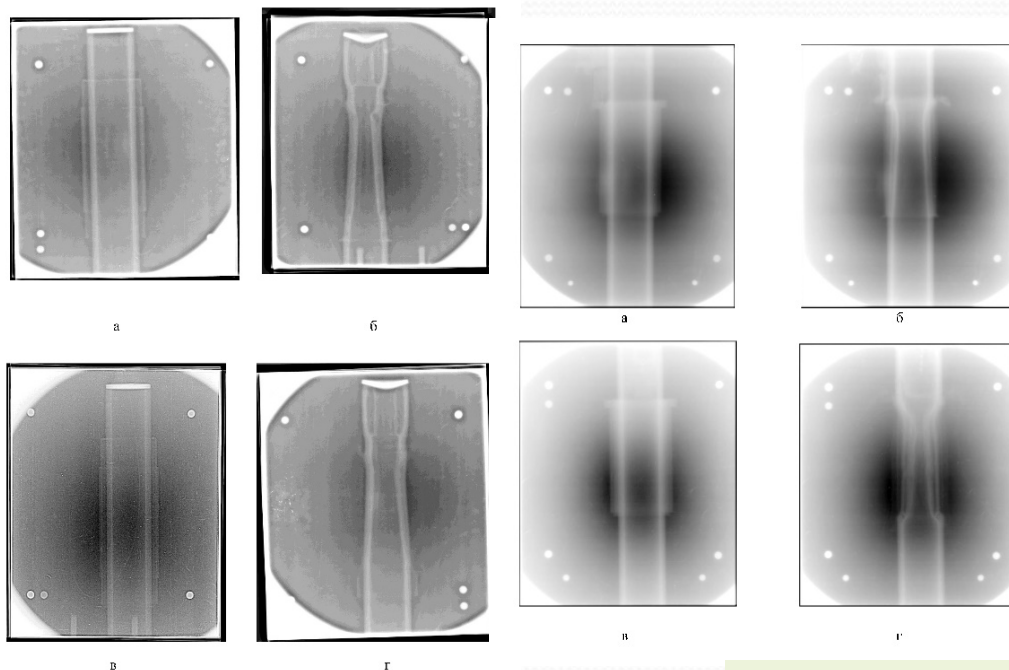
По рентгенограммам измеряли параметры движения оболочек – радиусы внешних  $R_{внеш.}$  и внутренних  $R_{внут.}$  стенок и рассчитывали **средние скорости схождения** внешних  $V_{внеш.}$  и внутренних  $V_{внут.}$  слоёв оболочек и скорости деформации  $V_{деф.} = V_{внут.}/r.$

Зная  $R_{внут.}$  при разных временах схождения, можно посчитать **истинные деформации  $e$**  слоёв оболочек до  $R_{внут.} > 7.3$  мм.

$$e = \ln r/R_{внут.}$$

Оболочка II

Оболочка III



Увеличение толщины ВВ на 1 мм увеличивает величину деформации на начальном этапе схождения в 2.9 раза

Откол на момент времени  $t=37$  мкс

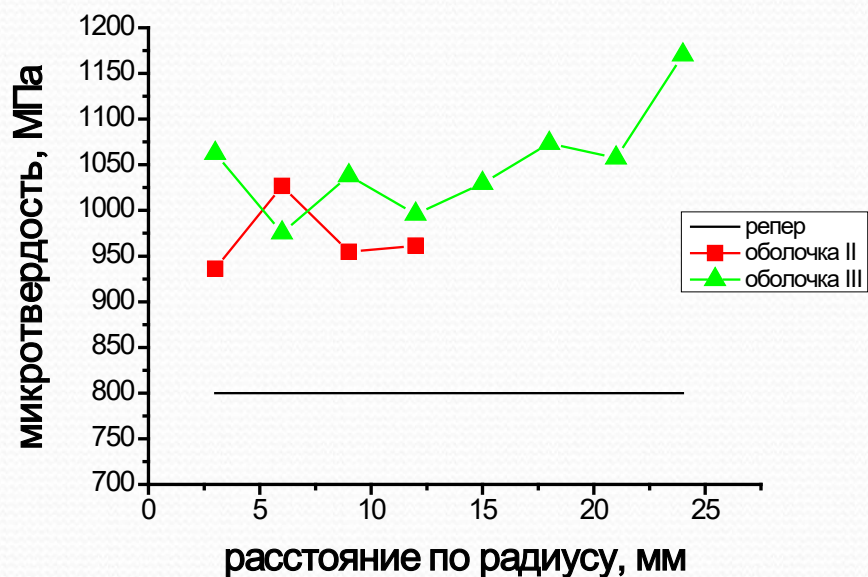
откол на момент времени  $t=70$  мкс

№	$V_{внут.}$ м/с	$V_{деф.} \times 10^3$ с <sup>-1</sup>	$e$
II	710	32.3	0.69
III	450	20.5	0.24

По мере схождения оболочки истинная деформация. центральных слоёв оболочек на  $R_{внут.} = 2-1$  мм увеличивается до  $e = 2.4-3.0$



# Микротвёрдость по радиусу оболочек



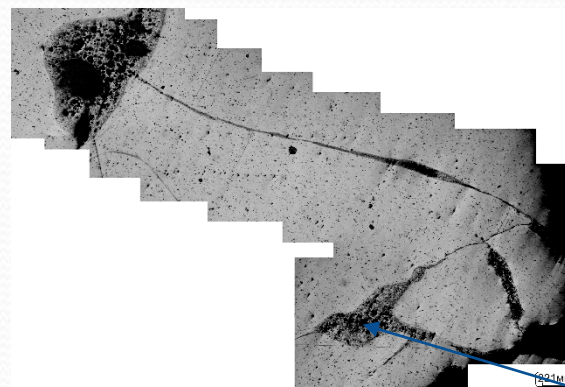
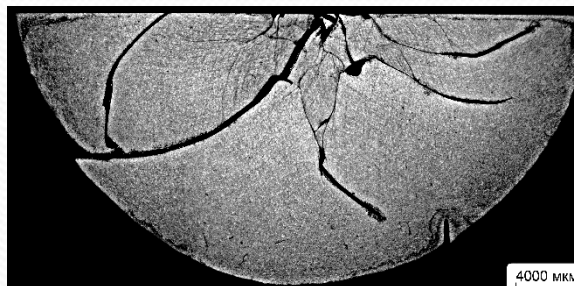
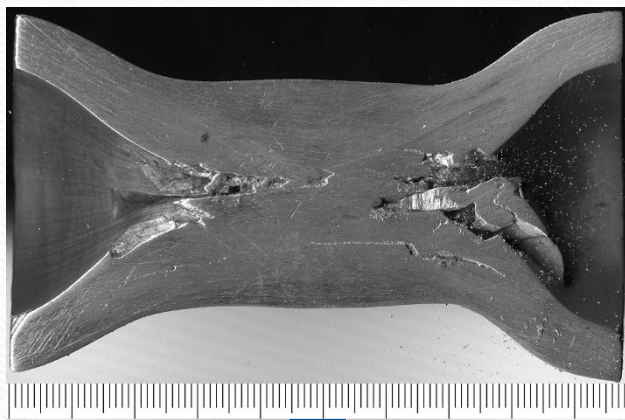
Независимо от режимов нагружения, материал упрочняется относительно репера на 200-300 МПа.

Твёрдость оболочка II ниже на 100-130 МПа  
Причина- релаксация напряжений за счёт нагрева при более интенсивной деформации

Разброс значений  $H_v$  свидетельствует о неоднородном наклёпе материала по радиусу оболочки вследствие чередования сильно- и слабдеформированных слоёв.

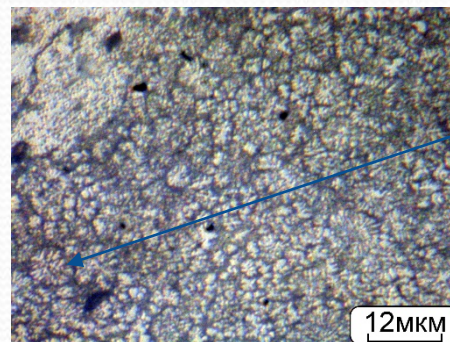
$H_{V_{cp. II}} = 950 \text{ МПа}$ ,  $H_{V_{cp. III}} = 1080 \text{ МПа}$

# Короткая оболочка из сплава АМг6



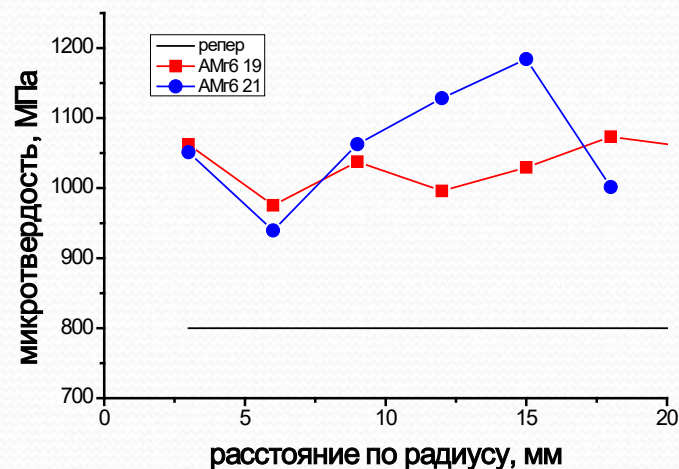
**Оболочка IV**  
 высота 250 мм,  
 h BB=5 мм +  
 прокладка –  
 песок+пластик+  
 пластик  
 (1.5-7-1.5 мм)

**В центре оболочки**  
**находится наиболее**  
**дефектная зона,**  
**в которой присутствуют**  
**непlothности**  
**и частично залеченные**  
**трещины**  
**с литой сфероли-**  
**топодобной**  
**дендритной струк-**  
**турой**  
**( размер зёрен) ~ 5 мкм**



**Полное схождение по всей высоте**  
**за исключением выброса**  
**небольшого фрагмента**

# Микротвёрдость короткой оболочки



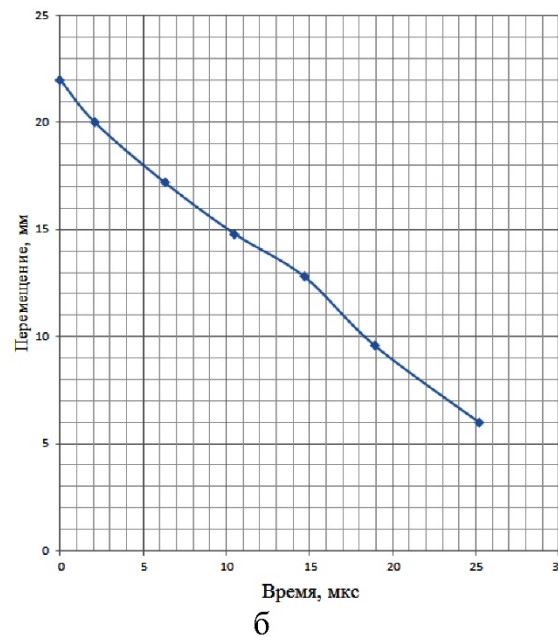
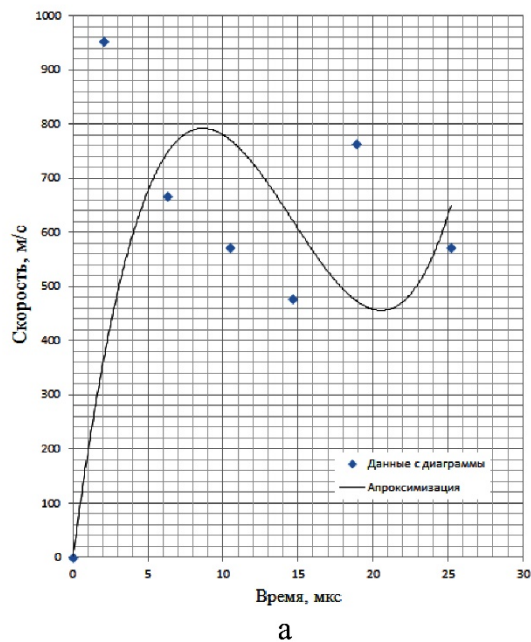
**Сравнение микротвёрдости по радиусу схлопнувшейся оболочки IV (синяя) в сравнении с микротвёрдостью оболочки III (красная)**

**По сравнению с равномерным изменением твердости по радиусу длинной оболочки III, твердость оболочки IV меняется немонотонно и уменьшается от 1100-1200 МПа до 950 МПа в областях, примыкающих к центральной зоне.**

**Достаточно сильное упрочнение оболочки IV относительно репера (350-400 МПа) свидетельствует о наклепе материала в процессе высокоскоростной деформации и отсутствии динамического возврата, приводящего к уменьшению напряженного состояния материала и снижению его твердости. В центре оболочки в области литой мелкодисперсной структуры твёрдость снижается, но остаётся выше твёрдости репера.**

# Высокоскоростная видеорегистрация короткой оболочки

видиорегистрация со скоростью 461000 кадров в сек, между кадрами 2.1 мкс



За 25 мкс R внут. уменьшился с 22 до 5 мм, оболочка сошлась.

Диаграмма параметров движения внутреннего контура оболочки:  
а- скорость, б- перемещение

Немонотонный характер изменения скорости схождения

# Заключение

**Исследованы особенности структурообразования при сжатии толстых оболочек ( $t/r=0.27$ ) из сплава АМгб в зависимости от интенсивности нагружения и их высоты.**

**Проведено рентгенографирование процесса сжатия, определены скорости сжатия, скорости деформации и истинная деформация оболочек высотой 500 мм в зависимости от интенсивности нагружения.**

**Установлены разные сценарии сжатия оболочек высотой 500 мм :  
при менее интенсивной нагрузке - оболочка сошлась с образованием скомпактированного внутреннего откольного слоя;  
при более интенсивной нагрузке - оболочка схлопнулась, а потом разошлась, но сохранила форму цилиндра.**

**Показано, что уменьшение высоты оболочки в два раза меняет сценарий сжатия.  
Подобран режим полного и устойчивого сжатия для оболочек высотой 250 мм:  
 $h_{BB}=5$  мм + прокладка –песок+пластик+пластик (1.5-7-1.5 мм)**



**СПАСИБО за  
ВНИМАНИЕ !**