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

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА СЦЕНАРИИ СХОЖДЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

И.Г. Бродова[1], И.Г. Ширинкина[1], А.Н. Петрова[1],
А.В. Коваль[2], Е.В. Шорохов[2], Е.Б. Смирнов[2], В.В. Астафьев[1], Т.И. Яблонских[1]
[1] Институт физики металлов УрО РАН имени М.Н. Михеева, Россия, г. Екатеринбург
[2] РФЯЦ-ВНИИТФ, Россия, г. Снежинск

brodova@imp.uran.ru

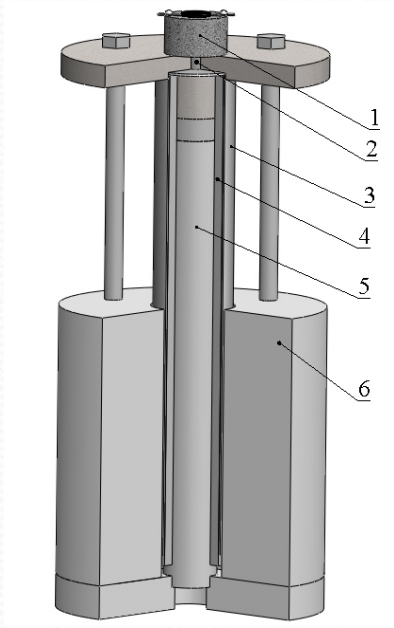
Ударно-волновое нагружение дает возможность исследовать поведение металлов и сплавов в экстремальных условиях. На основании изучения эволюции структуры сплавов можно прогнозировать пластические и прочностные свойства, а также выявить механизмы упрочнения материалов

Целью данной работы является исследование влияние условий нагружения при схлопывании цилиндрических алюминиевых оболочек разного химического состава 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.



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

Скорость детонации 7,8 км/с.

Механические свойства оболочек в состоянии поставки

Материал Оболочки	Предел прочности $\sigma_{в,}$ МПа	Предел текучести $\sigma_{т,}$ МПа	Относительное удлинение δ, %	Относительное сужение φ, %
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.

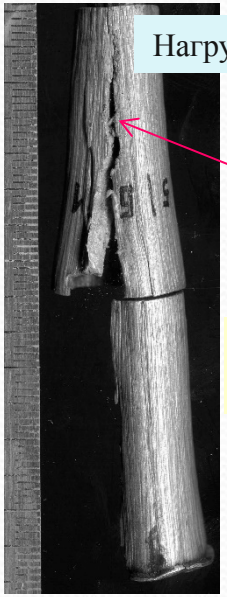
I серия – Влияние длительности импульса ударной волны.

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 Д16

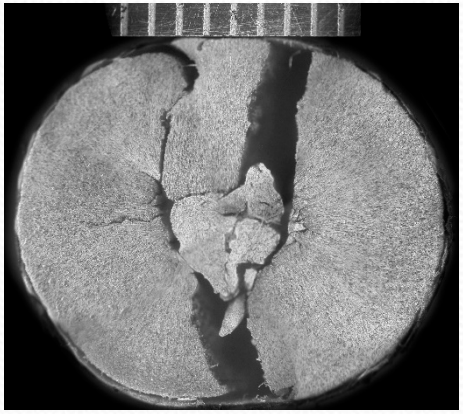
I серия экспериментов



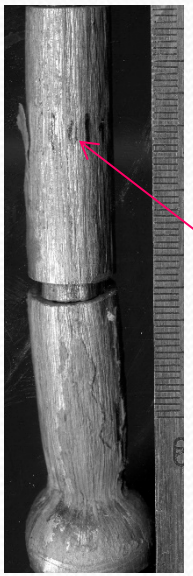
Нагружение без корпуса

Полосы как результат гидродинамичеких неустойчивостей: каверны, трещины

В результате инерционного схождения – множественные отколы

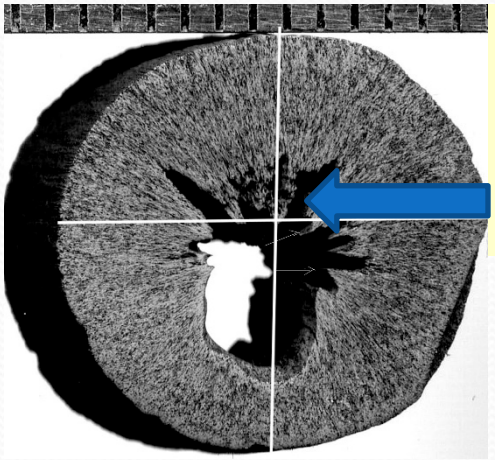


Типичная для высокоскоростной деформации Al сплавов полосовая структура с участками вихревого течения



Нагружение с корпусом

Каверн нет, поверхность гладкая, неглубокие трещины

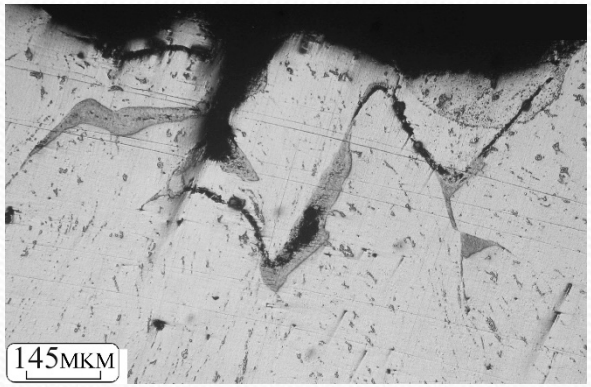


В результате схождения – центральная полость с радиальными трещинами

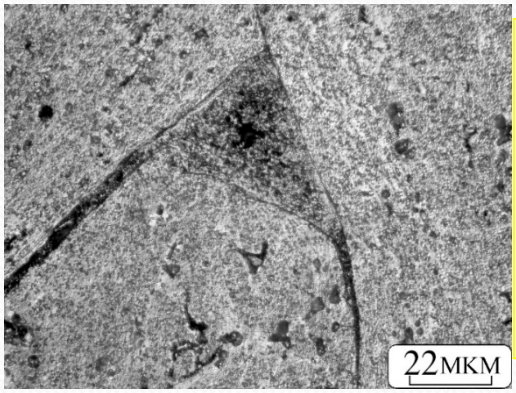
Эффекты локализованной деформации в оболочке сплава Д16 (нагружение без корпуса)

Эффекты взаимодействия ударных волн с волнами разгрузки приводят к формированию локализованной деформации разной формы

В результате локального повышения P и T.

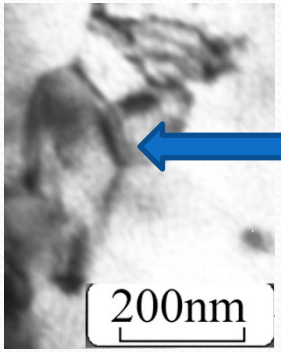


Зигзагообразная, частично залеченная трещина



Сегменты треугольной формы с залеченными трещинами.
Иллюстрируют откольных механизм локализации деформации и свидетельствуют о потере устойчивости ударной волны и возникновению на ее фронте возмущений, представляющих собой тройную ударную конфигурацию*

Вследствие локального повышения T на границе двух деформированных волокон происходят структурные превращения.

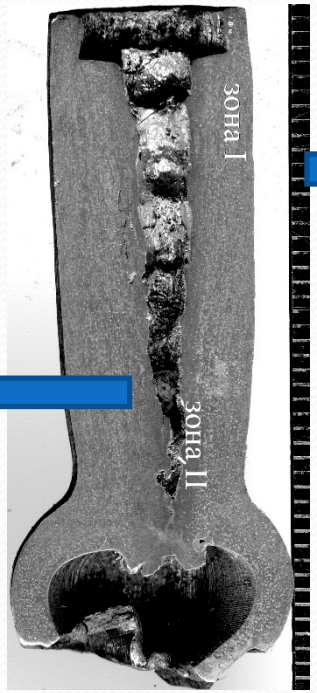


Бездефектные нанозёрна – как результат динамической рекристаллизации

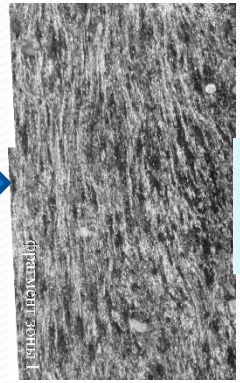
*Забабахин Е.И., Забабахин И.Е. Явления неограниченной кумуляции. М.: Наука. - 1988. - 172 с.
Бондарь М.П., Мержиевский Л.А. // Физика горения и взрыва. - 2006. - Т.42, №3. - С. 121-131.
Беликова А.Ф., Буравова С.Н., Гордополов Ю.А. // Журнал технической физики. - 2013. - Т. 83, Вып. 2. - С. 153-155.

Оболочка из сплава Д16 (нагружение с корпусом)

Две зоны с разной структурой:
I-поверхностная, зона деформации (3.5-4.5 мм)
II-центральная , зона плавления и кристаллизации (1.5-3.0 мм)

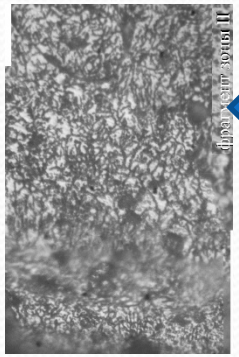


I зона



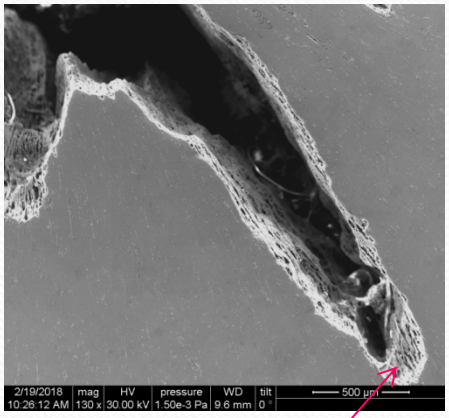
полосовая структура с редкими участками вихревого течения

II зона



Литая дендритная структура с порами

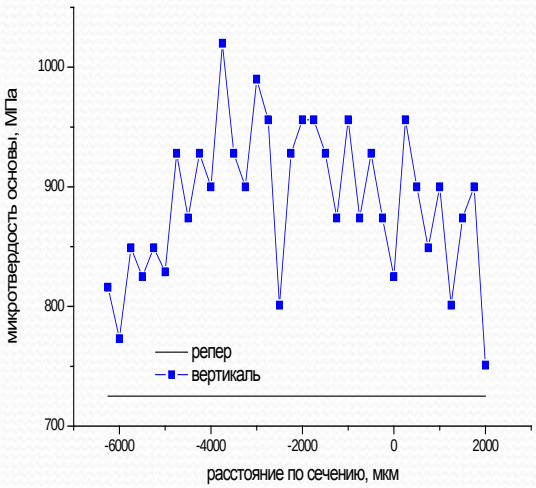
Центральная полость имеет коническую форму, сужающуюся к концу оболочки.



Зона II на поперечном сечении оболочки

Твёрдость оболочек из сплава Д16

Нагружение без корпуса

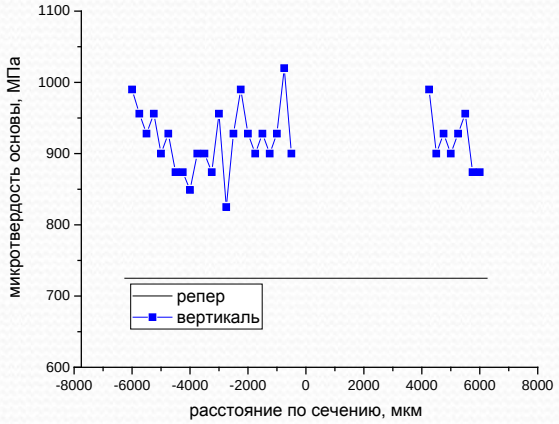


Hv=850-1025 МПа

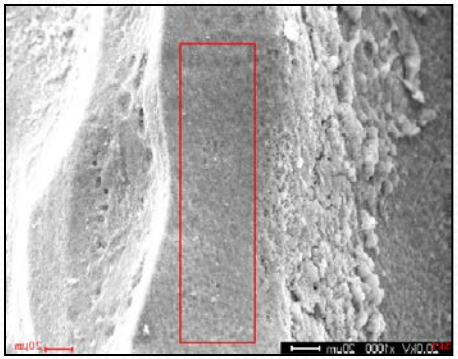
Разброс Hv меньше, наклёп материала равномерный по радиусу оболочки, схождение более устойчивое.

Разброс значений Hv свидетельствует о неоднородном наклёпе материала по радиусу оболочки вследствие чередования сильно- и слабодеформированных слоёв.

Нагружение с корпусом



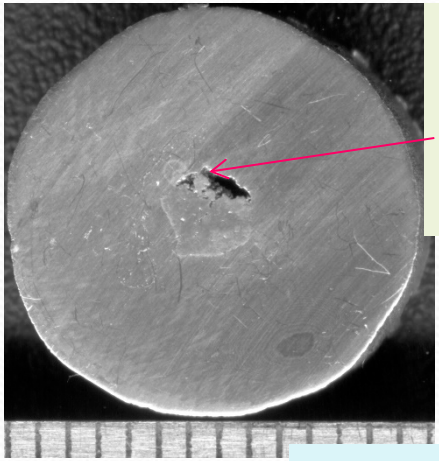
Hv зоны I =950-1025 МПа,



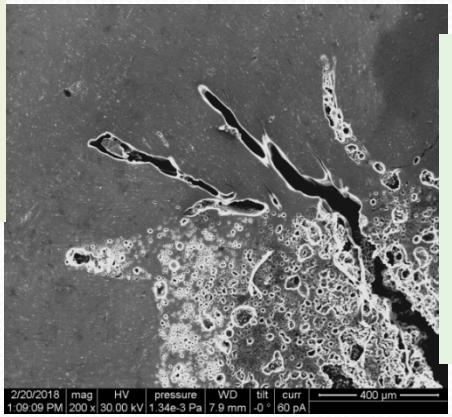
Hv зоны II =750-800 МПа

Оболочка из сплава АМц (нагружение без корпуса)

При обоих режимах энергии ВВ хватило для полного схлопывания оболочек, но характер их схождения разный



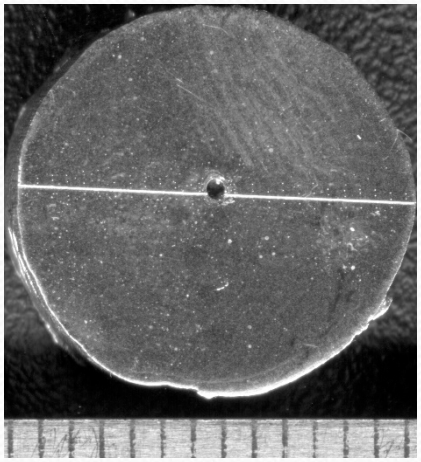
Центральная полость элипсоидной формы (1.5 -3.5 мм) отражает неустойчивость схождения оболочки в радиальном направлении



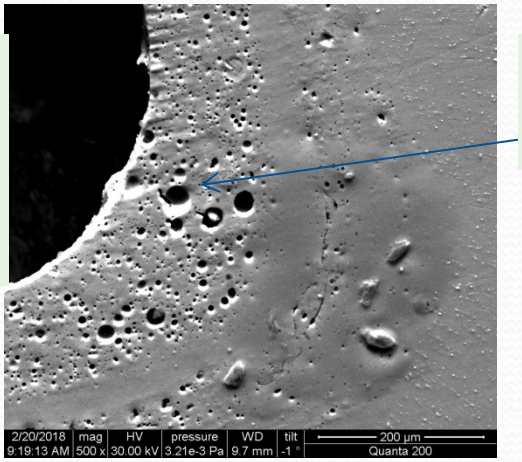
Около центра - поры, радиально залеченные трещины, выбросы металла. Характер пористой структуры свидетельствует о кипении и плавлении материала

В процессе схождения оболочки наблюдается явление кумуляции с резким повышением Т и Р. Происходит плавление (кипение) сплава с дальнейшей кристаллизацией расплава и формированием центральной зоны оболочки с литой структурой

Оболочка из сплава АМц(нагружение с корпусом)



Центральная полость правильной сферической формы (0.9 мм) отражает равномерное радиальное схождение оболочки к центру

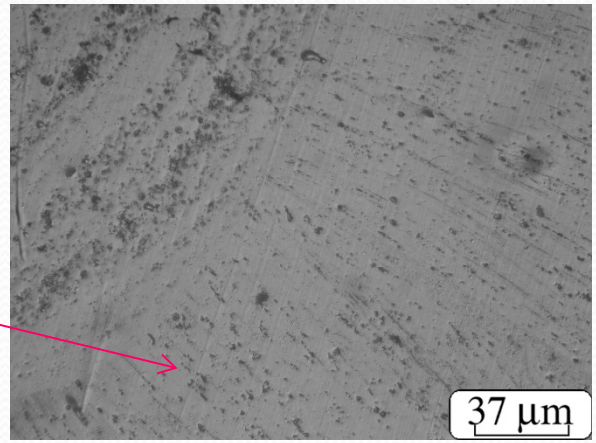


Зона 300-400 мкм с пористой и литой структурой

$T_{пл\ Al}$=650 °C
$T_{кип\ Al}$=2500 °C

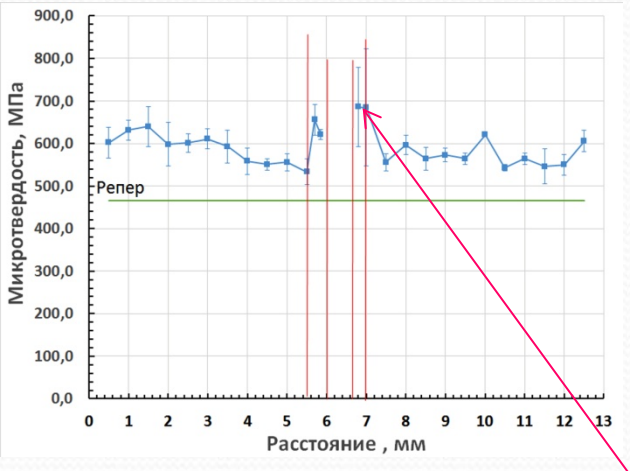
Откольных явлений нет, в центре наблюдается эффект кумуляции

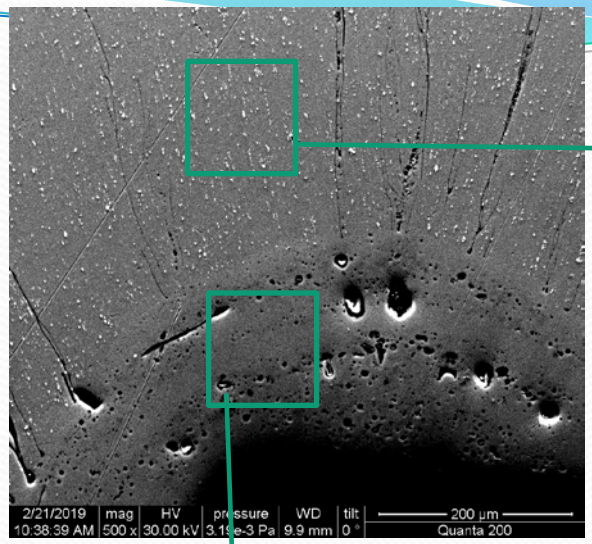
Зона деформированной структуры с радиально расположенными строчками интерметалидов, служащих реперами равномерного схождения оболочки.

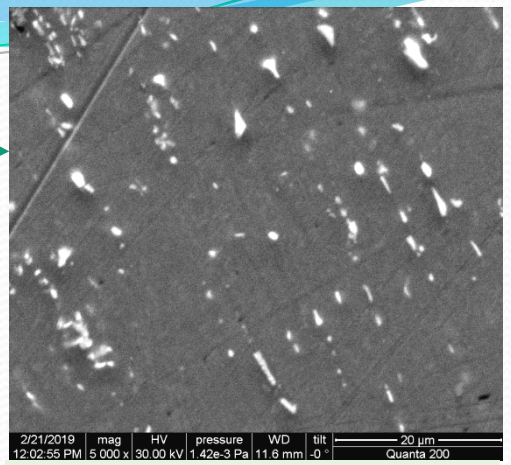


Структура центральной зоны оболочки АМц (с корпусом)

Hv=550-600 МПа

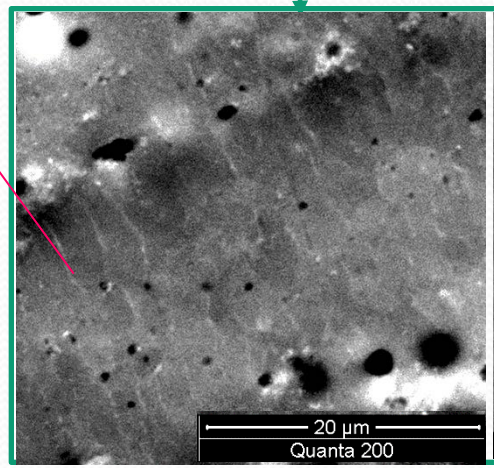


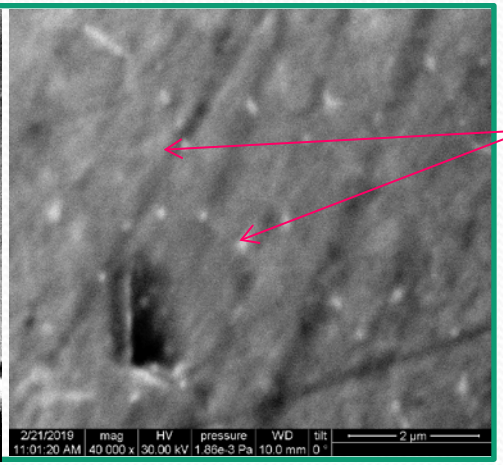




Размер интерметаллидов в деформированной зоне 1540 нм

Hv = 700 МПа





Al_6 (Mn, Fe)

Повышение твёрдости за счёт зернограничного и дисперсного упрочнения

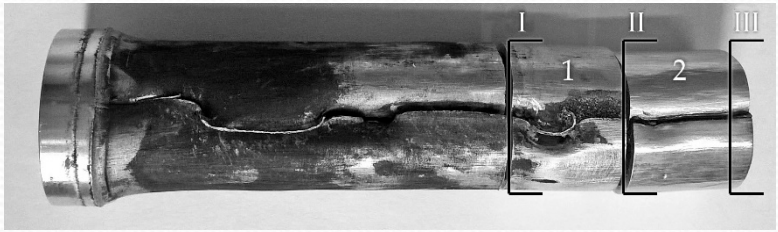
Мелкая структура сплава после быстрой закалки расплава. Размер интерметаллидов - 100 нм, размер зерна Al матрицы - 5 мкм.

Оболочка из сплава АМг6

h ВВ = 0.5 мм

II серия экспериментов

Неустойчивое частичное схождение по радиусу и вдоль оси цилиндра, разрывы, нарушение сплошности

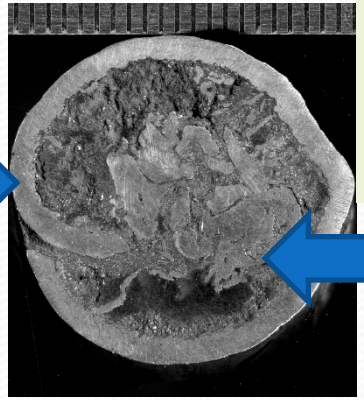


Вследствие откола оболочка разделилась на 2 части

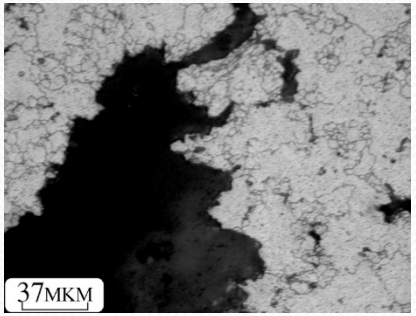
При высокоскоростной деформации нарушается симметрия схождения оболочки к центру, происходит смятие и дробление остального материала

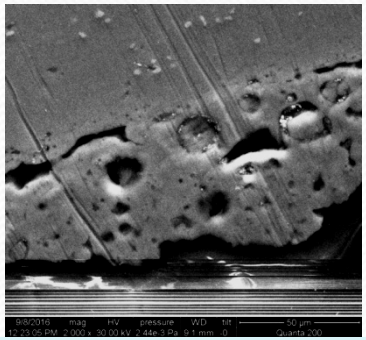
Взаимодействие ударной волны и волн разрежения приводит к кольцевому отколу

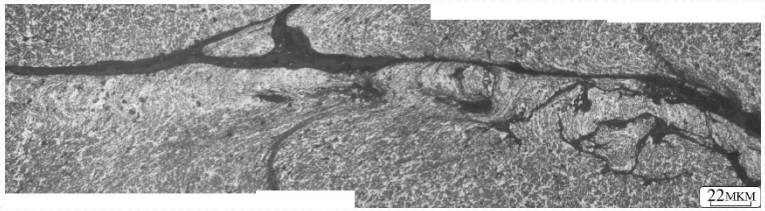
Наружное кольцо



Центральные Фрагменты







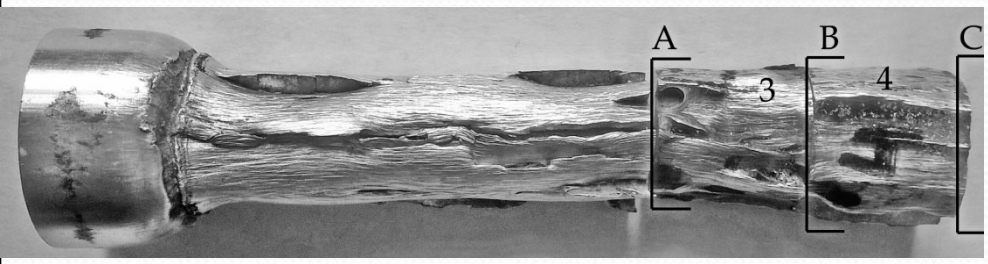
Зарождение откола в виде круглых пор, возникающих за счёт деформации всестороннего растяжения

Откольные, залеченные при инерционном схождении трещины, вихревое течение материала

Зубчатый характер поверхности откола

Оболочка из сплава АМг 6

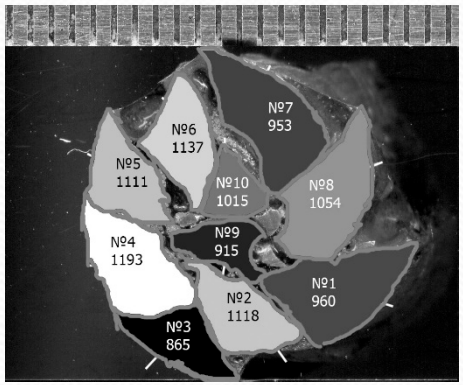
h ВВ =1 мм



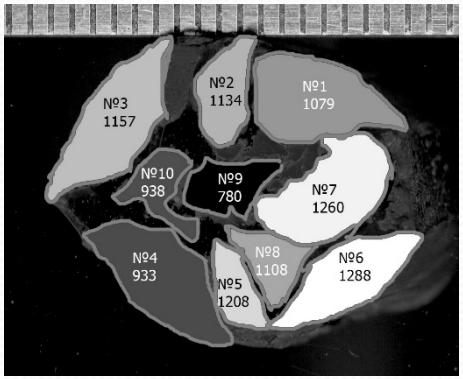
Деформация в радиальном и в осевом направлениях неравномерная.
Дефектность внешней поверхности оболочки возрастает.

После схождения образуются множественные отколы и 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;

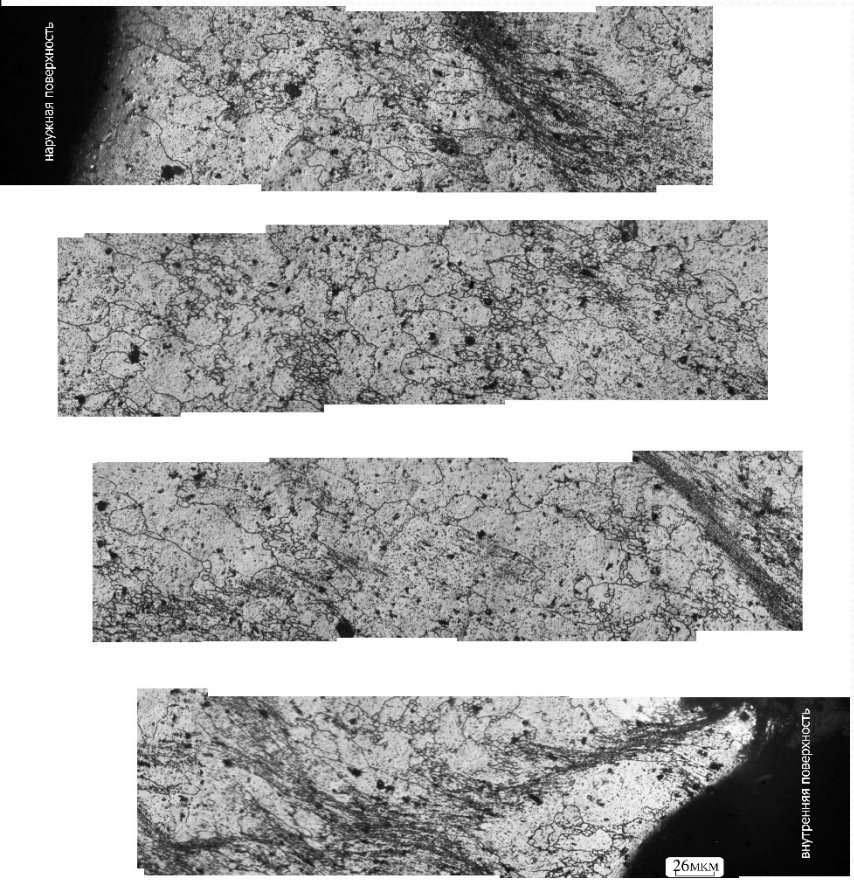


поперечное сечение 4С.

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.

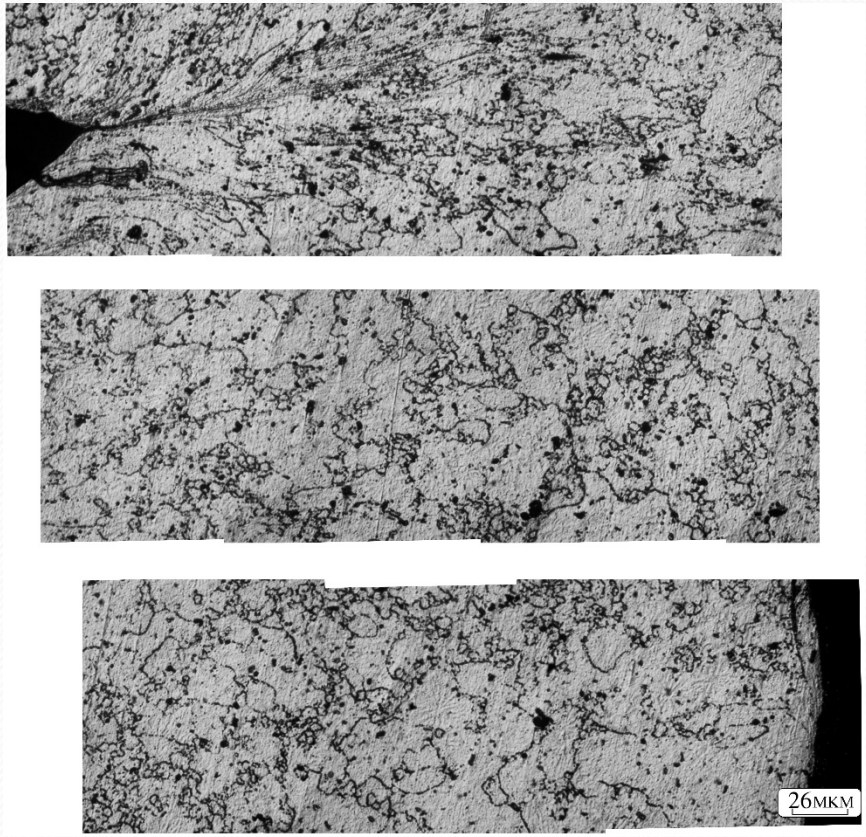
Микроструктура оболочки из сплава АМг6

Наружные фрагменты
Hv= 1200-1300 МПа



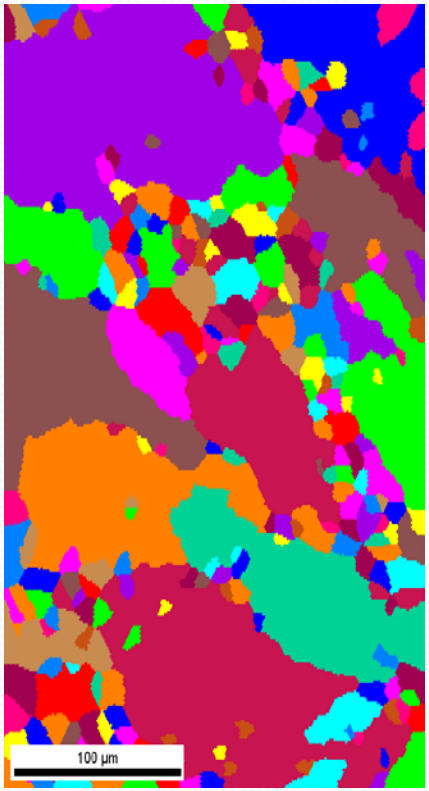
Деформированная структура,
полосы локализованной деформации,
залеченные откольные трещены

Центральные фрагменты
Hv=750-900 МПа

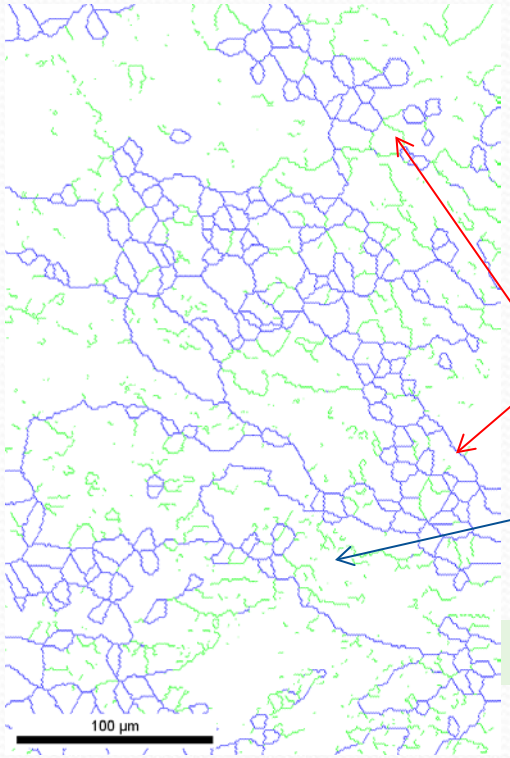


Залеченные откольные трещины,
более крупное зерно,
зоны плавления и дендритной кристаллизации

Оболочка АМг6 (центральный фрагмент)



Ориентационная карта ДОЭ



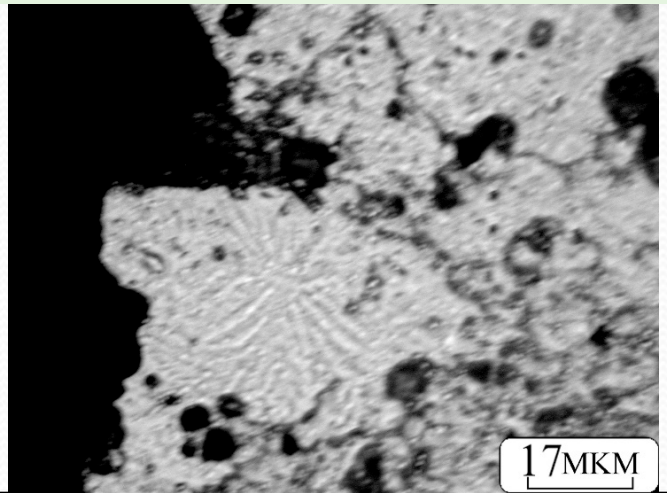
Границы зёрен-субзёрен

Смешанная, неравномерная по размерам зёрен- субзёрен, деформированная структура, Hv=1200 МПа

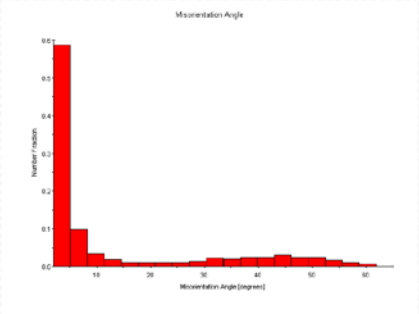
Зоны локализованной деформации с рекристаллизованной структурой d<10 мкм

Крупные зёрна с МУГ d ~ 100 мкм

Участок литой структурой, Hv=850 МПа



Структурные процессы, происходящие при схождении оболочки:
- Накопление дислокаций;
-Формирование протяжённой сетки МУГ;
-Бимодальное распределение зёрен по размерам



Заключение

- 1.Обнаружена зависимость полноты схождения и чередования структурных зон под воздействием инерционного высокоскоростного сжатия от состава и механических свойств сплавов, в частности, запаса пластичности. Так, ***при одних и тех же условиях нагружения (опыт без корпуса, h=1 мм)*** в оболочке из сплава Д16 и АМг6 формируются множественные отколы, и они распадаются на фрагменты, а более пластичная оболочка из сплава АМц сохраняет свою форму.
- 2. ***Меняя составы сплавов и величину импульса ударной волны*** (при h ВВ = 1), можно получить несколько разных сценариев схождения оболочек:

  - ***полное и устойчивое схождение*** *оболочки* – сплав АМц,(опыт с корпусом);

  -***неустойчивое схождение оболочки с образованием центральной полости*** – сплав АМц (опыт без корпуса) и сплав Д16 (опыт с корпусом);

  - ***образование множественных отколов после схождения оболочки*** - сплав Д16, (опыт без корпуса, 5 фрагментов), сплав АМг6 (опыт без корпуса, 9 фрагментов)
- 3. Показано, что при воздействии скользящими детонационными волнами

  механизмом высокоскоростной деформации Al сплава является скольжение, приводящее к накоплению дислокаций, формированию широкой сетки МУГ и развитой субструктуры. Происходит измельчению зерна и упрочнение материала.

  4. Вследствие эффекта кумуляции в центре оболочек из сплава АМц и оболочки из сплава Д16 , (нагружение с корпусом), происходит плавление (кипение) материала и формируются области с литой быстрозакристаллизованной структурой.

Спасибо за внимание!