

**ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ
И РЕОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ,
ДИНАМИКА КОНСТРУКЦИЙ**
**DYNAMIC STRENGTH AND RHEOLOGY
OF MATERIALS, DYNAMICS
OF CONSTRUCTIONS**

**ОЦЕНКА УСЛОВИЙ В ЗОНЕ КОНТАКТА ПРИ ВЗРЫВНОМ ОБЖАТИИ ДВУХСЛОЙНЫХ
КОРУНД / МЕДЬ ТРУБОК**

*И.А. Балаганский¹, И.С. Батраев², В.Ю. Ульяницкий^{1,2}, А.В. Пластинин²,
А.А. Штерцер², О.А. Зимоглядова¹*

¹Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

²Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

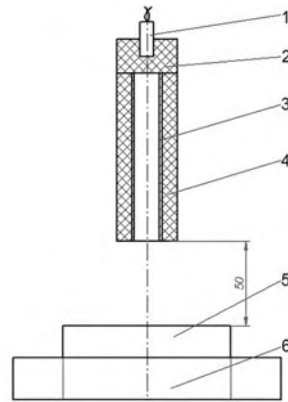
Введение

Известно, что при взрывном обжатию цилиндрических кумулятивных облицовок возможно образование кумулятивных струй, если скорость звука в облицовке превышает скорость детонации заряда ВВ [1]. В работе [2] было изучено формирование гиперскоростного потока керамических частиц при обжатию корундовых трубок и его действие по стальной мишени. В экспериментах было зафиксировано значительное проникающее действие потока керамических частиц. Металлографический анализ показал, что в процессе взаимодействия потока с мишенью материал мишени частично испарялся. Численный анализ процесса демонстрирует особенности формирования дискретной кумулятивной струи, максимальная скорость лидирующей части которой близка к 23 км/с, скорость основной части струи около 14 км/с. Однако, при взрывном обжатию керамических трубок не формируются сплошные кумулятивные струи. В статье [3] было высказано и численно обосновано предположение о возможности получения гиперскоростных сплошных кумулятивных струй при взрывном обжатию двухслойных корунд / медь трубок. В данной работе экспериментально и численно проанализированы особенности взрывного обжатию таких трубок.

Эксперименты с рентгеном

Для проведения экспериментов были изготовлены экспериментальные сборки показанные на рисунке 1. На медную трубку с внешним диаметром 7,4 мм, внутренним диаметром 6 мм и длиной 100 мм методом детонационного напыления наносился слой корунда толщиной 2,2 мм. Внешний диаметр заряда ТГ-40 был равен 30 мм, вес готовых зарядов был равен 100 г, вес инициирующего заряда 34 г.

Общий вид одной из экспериментальных сборок дан на рисунке 2. Всего вместе с отладочными было выполнено 6 экспериментов. Результаты экспериментов показали отсутствие сплошной медной кумулятивной струи, но в них были выявлены интересные особенности процесса взрывного обжатию двухслойных керамика/ медь трубок.



- 1 – электродетонатор;
- 2 – инициирующий заряд;
- 3 – основной заряд;
- 4 – двухслойная трубка;
- 5 – мишень;
- 6 – основание

Рисунок 1. Схема экспериментальной сборки

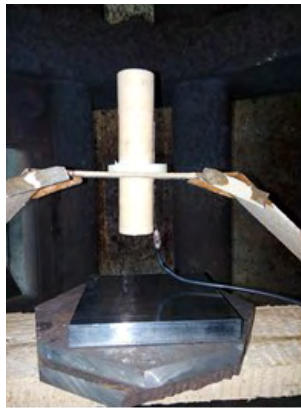
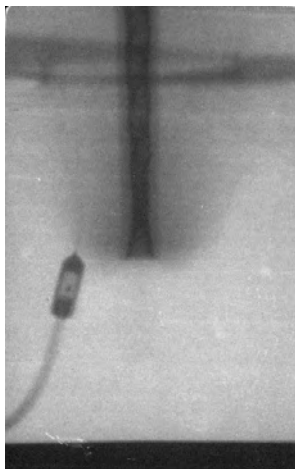


Рисунок 2. Общий вид экспериментальной сборки

На рисунке 3 показана типичная рентгенограмма одного из трех опытов по взрывному обжатию двухслойных керамика/ медь трубок. На рисунке 4 даны фотографии мишеней после подрывов. Во всех экспериментах скорость детонации, измеренная реостатными датчиками была равна 7,8 км/с

На рентгенограммах видно, что процесс имеет нестационарный характер, а на оси симметрии наблюдается периодическое образование полостей. Струя образуется только из нижней части облицовки и имеет скорость 2,5 км/с.

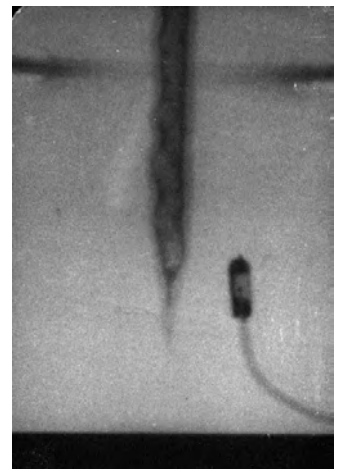
На мишенях из нержавеющей стали хорошо видны следы напыленной меди и керамики. Можно предположить, что в процессе взрывного обжатия трубок происходило испарение меди.



0,5 мкс



6,2 мкс



9,7 мкс

Рисунок 3. Последовательные стадии процесса взрывного обжатия двухслойной корунд/ медь трубки. Показаны времена с момента окончания процесса детонации заряда ВВ



Рисунок 4. Фотографии мишеней для опытов с трубкой № 3 (слева) и трубкой № 1 (справа)

Численное моделирование процесса взрывного обжатия двухслойных трубок

Для лучшего понимания процессов, происходящих при взрывном обжатии двухслойных трубок, было выполнено численное моделирование с использованием ANSYS AUTODYN. Моделирование проводилось в осесимметричной эйлеровой постановке. Нижняя граница расчетной области является осью симметрии.

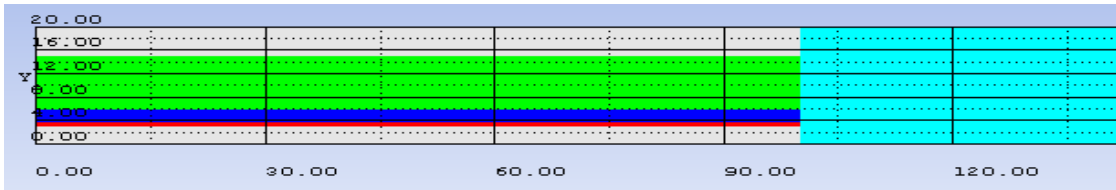


Рисунок 5. Начальная постановка задачи

Пространственное разрешение при постановке задач составляло 30 ячеек на 1 мм. Начальная конфигурация расчётной области соответствовала экспериментальным сборкам и показана на рисунке 5. Основные характеристики уравнений состояния участвующих в расчёте тел в терминологии AUTODYN даны в таблице 1. Параметры ударной адиабаты для корунда взяты из справочника [4] для давлений до 3 Мбар. Материал облицовки и мишени описывался ударной адиабатой, расчёт течения выполнялся по модели Джонсона-Кука. Результаты моделирования приведены далее в виде изолиний полей течений и графиков распределения основных параметров возникающих течений.

Таблица 1. Основные характеристики уравнений состояния участвующих в расчете тел

Material Name	Equation of State	Strength	Failure
Composition B	JWL	None	None
STEEL 1006	Shock	Johnson Cook	None
Copper	Shock	Johnson Cook	None
Al ₂ O ₃ Trunin	Shock	von Mises	Hydro (Pmin)

На рисунке 6 показана конфигурация полей течений и изолинии давлений в момент схлопывания трубки на ось симметрии $t=3,7$ мкс.

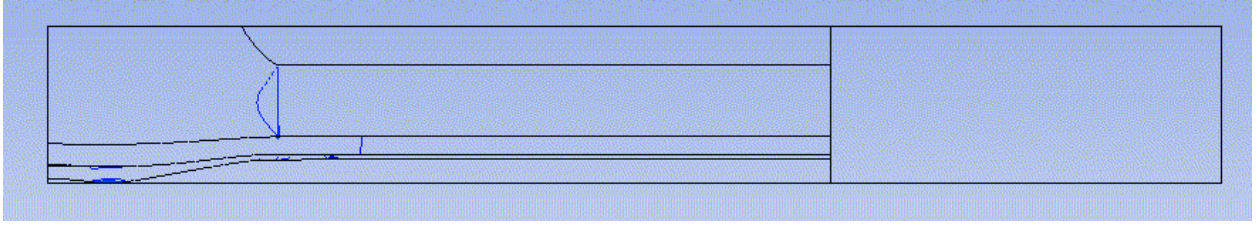


Рисунок 6. Поля течений и изолинии давлений $t=3,7$ мкс

Максимальное расчётное давление при схлопывании трубки около 3,5 ТПа, максимальная расчётная температура в зоне контакта 33860 К.

Отметим, что температура плавления меди 1358 К, температура кипения 2835 К при атмосферном давлении. Расчётные значения давлений и температур свидетельствуют о том, что начальные параметры в зоне контакта выходят далеко за пределы применимости определяющих соотношений для меди. Возможно плавление и испарение материала трубки в волне разрежения, что не учитывается в модели Джонсона Кука.

На рисунке 7 показана конфигурация полей течений и изолинии давлений в момент времени $t=5$ мкс. Можно видеть образование кумулятивной струи из материала медной трубки.

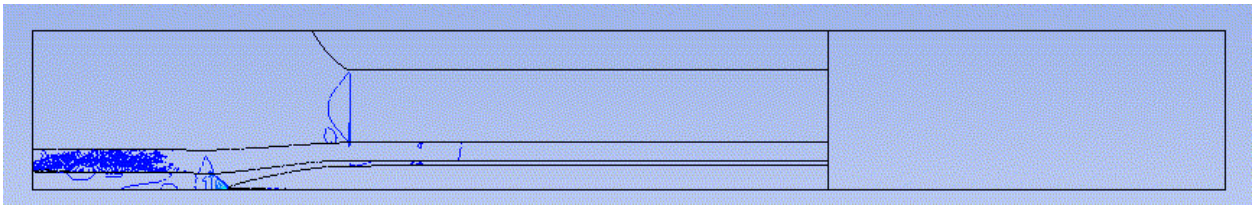


Рисунок 7. Поля течений и изолинии давлений $t=5$ мкс

На рисунке 8 даны пространственные графики распределения основных параметров течения вдоль оси симметрии.

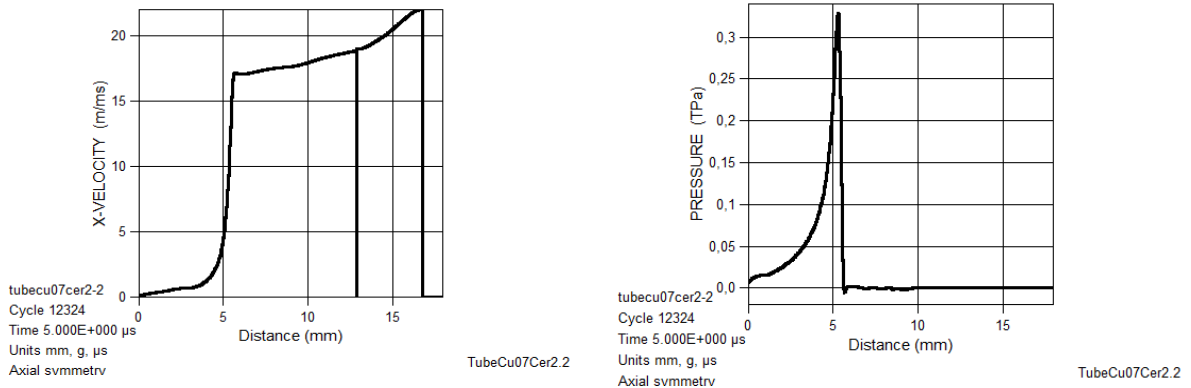


Рисунок 8. Профили массовой скорости и давления на оси симметрии в момент времени $t=5$ мкс

Максимальная температура в струе 2135 К, максимальная эффективная пластическая деформация струи 11,47.

На рисунке 9 показана конфигурация полей течений и изолинии давлений в момент времени $t=8,5$ мкс.

Полученные в расчетах значения давлений и температур на начальной нестационарной стадии связаны с тем, что начальные параметры в точке соударения далеко выходят за пределы применимости определяющих соотношений для меди.

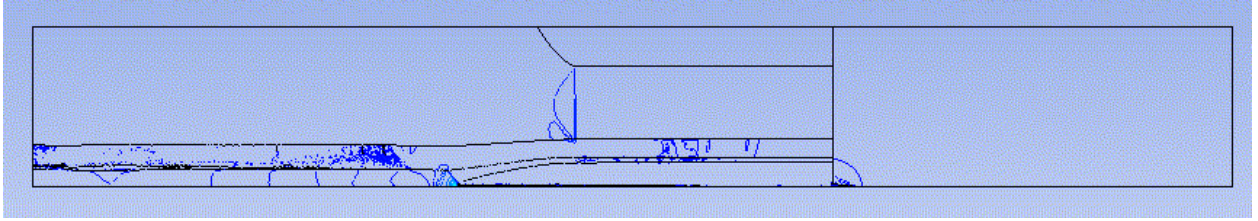


Рисунок 9. Поля течений и изолинии давлений $t=8,5$ мкс. Начало проникания струи в мишень

Численное моделирование с использованием уравнения состояния Тиллотсона для меди

В связи с изложенным была предпринята попытка моделирования начальной стадии с использованием широкодиапазонного уравнения состояния Тиллотсона. Это уравнение состояния позволяет рассчитывать параметры нагружения с учётом возможного плавления и испарения материала в волне разрежения. Все исходные данные при моделировании остались неизменными за исключением уравнения состояния меди, параметры которого были взяты из стандартной библиотеки AUTODYN.

На рис.10 показана конфигурация полей течений в области схлопывания трубки на ось симметрии $t=3,6$ мкс .

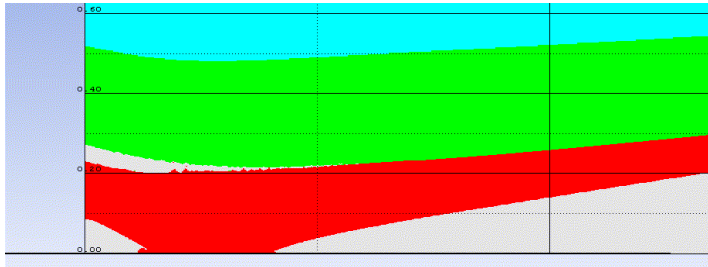


Рисунок 10. Поля течений $t=3,6$ мкс

Максимальное расчетное давление при схлопывании трубки около 4,5 Мбар, максимальная расчетная температура в зоне контакта 18200 К. Эти цифры выглядят более реалистично, по сравнению с ранее полученными. Они также значительно превышают температуру плавления и испарения меди.

На рисунке 11 показана конфигурация полей течений в зоне схлопывания в момент $t=3,8$ мкс. Можно видеть потоки испаренной меди. Струеобразование в точке контакта не наблюдается.

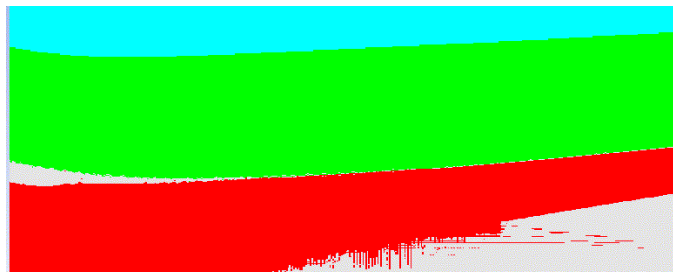


Рисунок 11. Поля течений $t=3,8$ мкс

На рисунке 12 даны графики распределения плотности и массовой скорости на расстоянии 1 мм от оси симметрии. Характер распределения плотности свидетельствует об испарении материала меди.

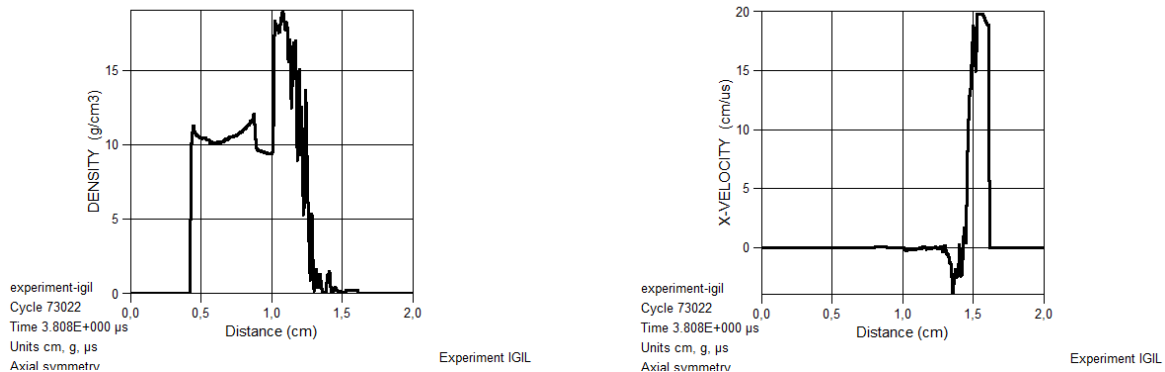


Рисунок 12. Распределение плотности и массовой скорости вдоль линии на расстоянии 1 мм от оси симметрии $t=3,8$ мкс

Выводы

Анализ результатов экспериментов и численного моделирования процесса взрывного обжатия двухслойных трубок позволяет сделать следующие выводы:

1. Нарушения процесса струеобразования связаны с высокими значениями давления и температуры, которые приводят к плавлению и испарению меди, что в дальнейшем приводит к образованию полостей внутри медной трубки.
2. Дальнейшие исследования должны быть направлены на углублённый анализ процесса взрывного обжатия двухслойных трубок с использованием адекватных определяющих соотношений для описания материалов при численном моделировании.

Список литературы

1. Ю.А. Тришин. О некоторых физических проблемах кумуляции // ПМТФ, 2000, Т.41, №5, С.10-26.
2. И.А. Балаганский, Л.А. Мерзгиевский, В.Ю. Ульяницкий, И.А. Батаев, А.А. Батаев, А.Д. Матросов,
3. И.А. Стадниченко, И.С. Батраев, А.В. Виноградов. Генерация гиперскоростных потоков частиц при взрывном обжатии керамических трубок //ФГВ, 2018, Т.54, №1, С. 132-138.
4. I.A. Balagansky, A.V. Vinogradov, L.A. Merzhievsky. Modelling of fast jet formation under explosion collision of two-layer alumina/copper tubes // The International Journal of Multiphysics, 2017, Vol. 11, № 3, pp. 265-375.
5. R.F. Trunin, L.F. Gudarenko, M.V. Zhernokletov, G.V. Simakov. Experimental Data on Shock Compression and Adiabatic Expansion of Condensed Matter // Sarov: RFNC-VNIIEF, 2001.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ ЗВУКА И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА В БЕРИЛЛИИ НА УДАРНОЙ АДИАБАТЕ

Д.В. Крючков, В.И. Скоков, А.Н. Малышев, Д.Н. Замотаев, В.В. Барабин, Е.В. Кошатова, А.Н. Катыхов

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

В работе представлены экспериментальные данные по продольной, объемной скорости звука и коэффициенту Пуассона бериллия в диапазоне давлений ударной волны от 6 до 61 ГПа, полученные методом обратного удара, в котором движущийся исследуемый образец из бериллия тормозится на преграде из LiF. Экспериментальная информация представляет собой профиль скорости контактной границы Be-LiF, измеренный лазерным интерферометром. В диапазоне