

3. E.A.Kozlov, D.G.Pankratov, V.I.Tarzhanov, I.V.Telichko, Dynamic shear and spall strengths of preliminarily quasi-statically extruded fine-grained uranium and U-0.3% Mo alloy, *The Physics of Metals and Metallography*, 2009; v. 108, No 4, pp. 401-414
4. E.A.Kozlov, S.V.Bondarchuk, Yu.N.Zuev, S.M.Novgorodtsev, Mechanisms of High-Strain-Rate Deformation and Fracture of Fine-Grained Unalloyed Uranium upon Explosive Loading, *The Physics of Metals and Metallography* (Engl. transl.), 2011, V. 111, No. 4, pp.410-420.

ОСОБЕННОСТИ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ В МЕДИ ПРИ КВАЗИОСЕСИММЕТРИЧНОМ СХОЖДЕНИИ

*М.Ю. Батьков, О.А. Тюпанова, М.И. Шмакова, Е.А. Чудаков, И.В. Шмелёв,
Л.К. Антонюк, А.Н. Баландина, М.И. Ткаченко*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Введение

В классической редакции экспериментов, посвящённых изучению процесса откольного разрушения, импульсные растягивающие напряжения реализуются в плоских образцах из исследуемых материалов. Для создания одномерного напряженно-деформированного состояния используется метод торможения плоской пластины-ударника или взрыв слоя ВВ.

Новые перспективы открываются при переходе к экспериментам, в которых напряженно-деформированное состояние является неодномерным [1] или обладает цилиндрической [2] или сферической симметрией [3], [4]. Численное моделирование таких опытов позволяет тестировать модели разрушения в условиях неодномерных течений. В частности, одним из преимуществ экспериментов, в которых реализуется осесимметричное схождение, является возможность исследовать совокупность процессов (откольное разрушение, компактирование поврежденной среды, разрушение на сдвиговых деформациях), протекающих одновременно.

В настоящей работе представлены редакция и результаты эксперимента по исследованию особенностей процессов разрушения в толстостенном медном цилиндре при осесимметричном нагружении.

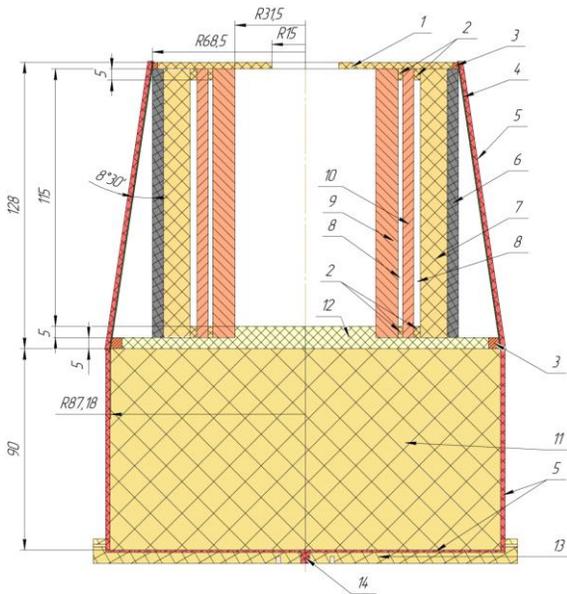
1. Постановка эксперимента

Для реализации в полой цилиндрической мишени сходящейся ударной волны применён метод соударения. Для разгона цилиндрического ударника до требуемой скорости использовано устройство, в котором за счет энергии взрыва тонкого слоя ВВ, инициируемого в режиме скользящей детонации, ускоряется тонкий ($\Delta_L = 0,5$ мм) конический медный лайнер. Угол раствора конической оболочки и её толщина, а также толщина ВВ обеспечивали приемлемую степень синхронности подлёта лайнера к двухслойному цилиндрическому демпферу («трансформатору импульса»), внутри которого расположен медный цилиндрический ударник. Ударник разгонялся до скорости ~ 175 м/с и формировал импульс квазисимметричного сжатия (амплитудой ~ 3 ГПа) при торможении на толстостенной полой цилиндрической мишени. Таким образом, в рассматриваемом устройстве отсутствовала многоточечная система инициирования, вносящая (при инициировании относительно тонких слоев ВВ) разномасштабные возмущения в процесс разгона ударников. Габаритные размеры компонентов экспериментальной сборки определены в рамках численного моделирования с использованием 2D программного эйлерового комплекса ВНИИЭФ. В частности, толщины ударника и мишени выбраны достаточно большими, в том числе, чтобы снизить интенсивность нагружающего импульса за счет затухания волн и зарегистрировать

начальную стадию процесса разрушения откольного слоя на сдвиговых деформациях при осесимметричном сжатии. Эскиз экспериментальной сборки показан на рисунке 1. Согласно данным, полученным при рентгенографической регистрации динамики лайнера в аналогичной постановке, асинхронность подлета лайнера к нагружаемой цилиндрической поверхности вдоль образующей составляет не более 0,0125 мкс/мм при скорости $(1,25 \pm 0,05)$ км/с.

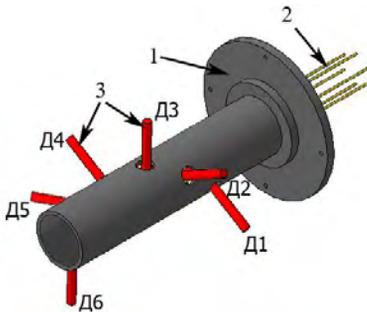
Лайнер выполнен из двух частей (листовая прокатная медь М1), закреплённых пайкой на двух стальных торцевых кольцах. Из-за малой толщины лайнера для скрепления частей по образующей не использовалась сварка, что обусловило наличие разрывов сплошности в области их стыковки. Кроме того, на поверхности лайнера в процессе придания ему формы и крепления на кольцах образовались возмущения макромасштаба (заломы, выпуклости и впадины).

Ударник и мишень, представляющие собой прямые цилиндры, изготавливались точением из цельного прутка меди марки М1. Внутренние полости не вакуумировались.



- 1 – крышка (пенопласт);
- 2 – кольца позиционные (пенопласт, высота 5 мм, толщина стенки 3 и 2 мм);
- 3 – кольца торцевые (сталь);
- 4 – лайнер (Cu, $\Delta = 0,5$ мм);
- 5 – ВВ ($\Delta_{ВВ} = 2$ мм);
- 6 – внешний слой «трансформатора импульса» (ФТ-4, $\varnothing_{внеш} = 137$ мм, $\Delta_{ФТ} = 5$ мм);
- 7 – внутренний слой трансформатора импульса (пенопласт, $\varnothing_{внеш} = 127$ мм, $\Delta_{ПС} = 12$ мм, $\rho \sim 0,65$ г/см³);
- 8 – воздушный зазор (толщина 3 и 2 мм);
- 9 – мишень ($\varnothing_{внеш} = 83$ мм, $\Delta_{М} = 10$ мм);
- 10 – ударник ($\varnothing_{внеш} = 97$ мм, $\Delta_{УД} = 5$ мм);
- 11 – буфер;
- 12 – дно (пенопласт);
- 13 – накладка;
- 14 – инициатор

Рисунок 1. Эскиз конструкции нагружающего устройства



- 1 – приемник;
- 2 – измерительные оптоволоконные линии;
- 3 – зондирующее излучение

Рисунок 2. Измерительный узел PDV

В отверстие в пенопластовой крышке на оси сборки вставлялся измерительный узел, содержащий 6 датчиков гетеродин-интерферометра (системы PDV) [5], регистрирующих скорость движения внутренней поверхности мишени (см. рисунок 2). Измерения проводились по азимутальному углу 360°, с шагом 60°. Нумерация коллиматоров начиналась от основания приёмника и продолжалась против часовой стрелки.

2. Результаты эксперимента

Характерная спектрограмма, полученная в описываемом эксперименте с помощью гетеродин-интерферометра, приведена на рисунке 3а. На рисунке 3б представлены экспериментальные зависимости скорости движения внутренней поверхности цилиндрической мишени, полученные после обработки исходных данных (результат датчика 5 не представлен). Видно, что амплитудно-временные характеристики профилей скорости свободной поверхности $W(t)$ и время выхода ударной волны на внутреннюю поверхность цилиндрической мишени существенно различаются в зависимости от координаты зондирования.

Максимальная разновременность начала движения внутренней поверхности мишени на зондируемом участке по высоте мишени составила $\sim 4,4$ мкс. Первым выход ударной волны зарегистрировал датчик 6, располагавшийся ближе остальных датчиков к нижнему торцу мишени (со стороны инициирования детонации в слое ВВ, облицовывающем медный лайнер – см. рисунки 1, 2). Самый поздний момент начала движения внутренней поверхности мишени зарегистрирован в точке зондирования датчика 1, находящегося ближе к верхнему торцу мишени, соответствующему минимальному диаметру конического медного лайнера. Профиль волны сжатия, полученный этим датчиком, отличается завышенной амплитудой, существенной нестационарностью и отсутствием откольного импульса.

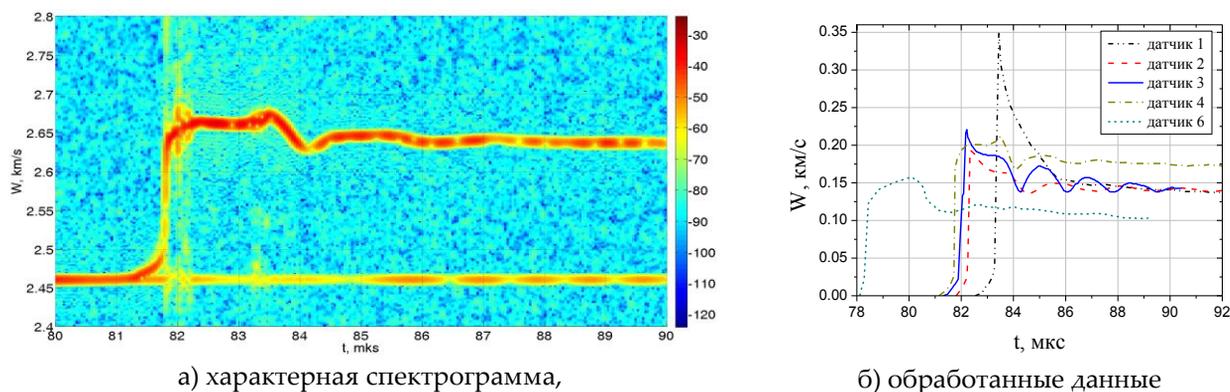


Рисунок 3. Зависимости скорости движения внутренней поверхности мишени, зарегистрированные гетеродин-интерферометром (отсчет времени – от срабатывания инициатора)

Такое заметное различие по моменту выхода ударной волны между датчиками 1 и 6 указывает на наличие осевой составляющей в скорости движения толстостенного ударника и, соответственно, лайнера. В свою очередь, показания датчиков 2, 3, 4, располагавшихся последовательно в секторе с углом 120° , отличаются на порядок меньшей разновременностью и имеют близкие амплитудно-временные характеристики. Следовательно, можно предположить, что в рассматриваемом эксперименте реализовалось не вполне корректное движение одной из заготовок, из которых выполнен конический лайнер. Наиболее вероятной причиной этого является не идеально-коническая начальная форма тонкого лайнера. Однако, постопытная форма ударника указывает на высокую вероятность его осесимметричного схождения на мишени за счет симметризации возмущения от лайнера в составном «трансформаторе импульса».

Оценка величины откольной прочности меди, выполненная по известной формуле $\sigma_{отк} = 0,5 \cdot \rho_0 \cdot C_0 \cdot \Delta W$, где ρ_0 – плотность, C_0 – объемная скорость звука, ΔW – разница между первым максимумом и первым минимумом зависимости $W(t)$, дает следующие значения $\sigma_{отк} = 0,56$ ГПа при использовании амплитудных характеристик зависимости $W(t)$, зафиксированной датчиком 4. Эта величина хорошо согласуется с известными данными.

Выполнено предварительное численное моделирование (в 1D приближении [6]) результатов регистрации с помощью гетеродин-интерферометра. В расчётах задавалась скорость тонкого лайнера в момент его подлёта к «трансформатору импульса», полученная по формуле из [7]: $W_{л} = 0,65 \cdot D \cdot \alpha / (\alpha + 2)$, где D – скорость детонации используемого ВВ, α – отношение удельной массы ВВ

к удельной массе лайнера. Медь рассматривалась как вязкоупругопластическая среда с УРС в форме Ми-Грюнайзена с переменной Γ и девиатором напряжений в форме модели РИНГ [8]. Для описания сопротивления меди действию импульсных растягивающих напряжений использована кинетическая модель откольного разрушения типа модели NAG [9]. Фторопласт представлялся как идеальная упругая среда с УРС в форме Ми-Грюнайзена с постоянной Γ . Поведение пенопласта при воздействии ударных волн моделировалось с использованием уравнения состояния пористого вещества в форме Я.Б.Зельдовича. Из рисунка 4 следует, что в расчёте получено вполне приемлемое согласие с экспериментом по амплитудно-временным характеристикам зависимости $W(t)$.

Таким образом, совокупность экспериментальных зависимостей $W(t)$, полученных с помощью датчиков, установленных на различных координатах по оси мишени в рассматриваемой редакции опыта, позволяет проследить динамику течений, реализующихся в мишени как в азимутальном, так и в осевом направлениях.

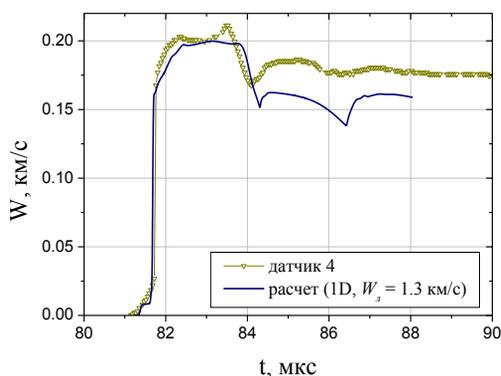


Рисунок 4. Сравнение экспериментальной и расчётной зависимости $W(t)$ скорости движения внутренней поверхности мишени

После эксперимента мишень располагалась внутри ударника и была легко извлечена из него при разборке экспериментального устройства. Оба элемента экспериментальной сборки сохранили цилиндрическую форму. Ударник деформирован слабо и демонстрировал высокую степень осевой симметрии (внешний диаметр ударника после опыта находится в диапазоне $90,65 \div 92,0$ мм, т.е. уменьшился на ~6 %).

На внешней поверхности мишени наблюдались области деформации, вытянутые вдоль её оси, и эта поверхность демонстрировала слабую степень «гофрировки» (рисунок 5а). Внутренняя поверхность мишени гофрирована в гораздо большей степени – см. рисунок 5б,в.



а) вид внешней поверхности;

б) вид со стороны «верхнего» торца;

г) вид со стороны «нижнего» торца

Рисунок 5. Внешний вид мишени после опыта

При этом деформация внутренней поверхности в виде углублений и выпуклостей, в целом, симметрична по угловой координате. Внутренний «диаметр» сохраненной мишени в ее центральной части по высоте $\varnothing_{\text{внутр}}^{\text{ксп}} = (46,6 \pm 0,4)$ мм. По измерениям, выполненным на двух торцах и

на половине высоты мишени (по два измерения во взаимно перпендикулярных направлениях на каждой координате), внешний диаметр мишени составляет: 78,6; 79,1 мм (верхний торец); 75,7; 79,2 мм (половина высоты); 79,2; 79,5 мм (нижний торец). В результате обжатия внешний диаметр мишени изменился на $4,5 \div 8,8\%$.

Для проведения металлографического анализа мишень была разрезана на три цилиндрические части, высота каждой из которых соответствует примерно 1/3 исходной высоты мишени. Далее представлены результаты анализа структуры центральной части (высотой ~40 мм), в которой реализовавшиеся течения свободны от влияния «краевых эффектов» вблизи торцевых поверхностей. На рисунке 6 представлены фото торцов центральной части. Видно, что в мишени произошло интенсивное откольное разрушение с полным отделением откольного слоя практически во всех координатах по азимутальному углу. Толщина откольного слоя, измеренная на торцах центральной части, находится в диапазоне (5,85÷6,15) мм. Толщина ответной части лежит в пределах (5,1÷5,3) мм; толщина мишени увеличилась при сжатии на ~10÷15 %.

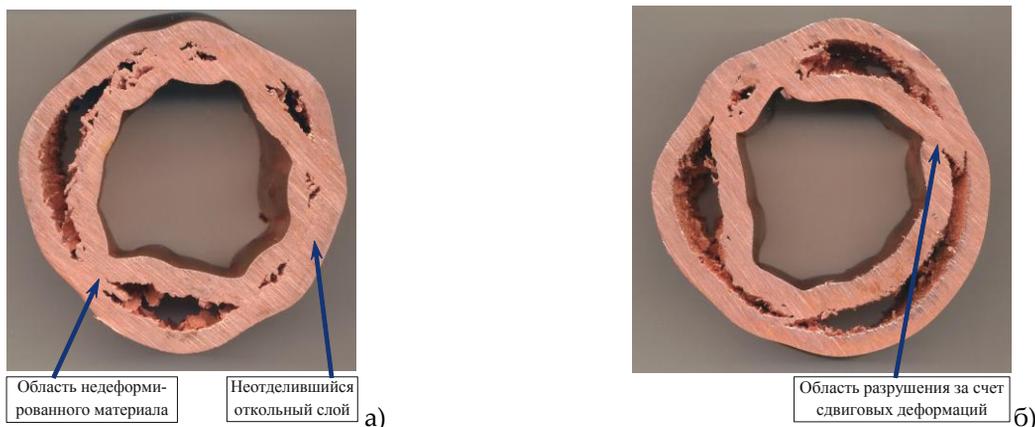


Рисунок 6. Фото торцов центральной части мишени

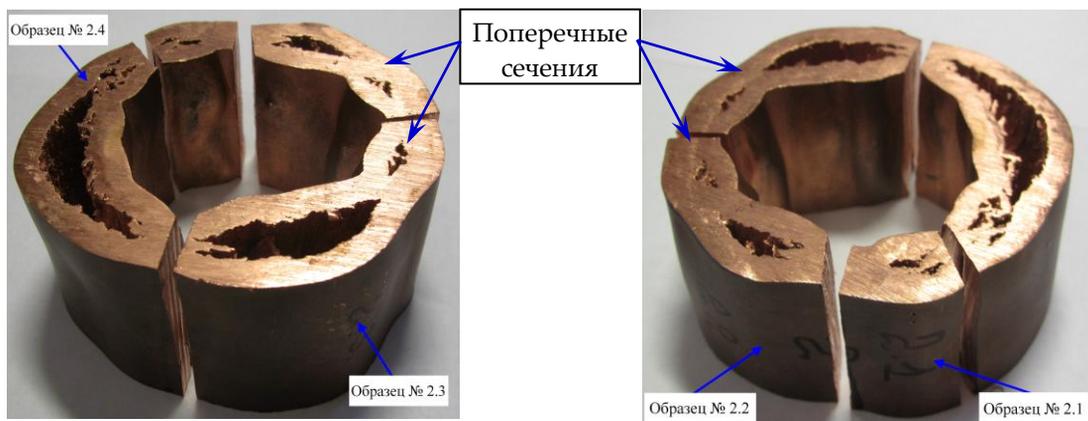


Рисунок 7. Центральная часть мишени после разрезки на образцы

Процесс сжатия откольного слоя сопровождался заметной его деформацией и разрушением на сдвиге. На торцах рассматриваемой части мишени наблюдаются области, в которых произошло взаимное смещение частей откольного слоя – см. рисунок 6б. В то же время, присутствуют области, в которых не произошло отделение откольного слоя, хотя поврежденность откольного характера явно сформировалась, а также области, в которых при визуальной оценке не имеется никаких нарушений структуры и материал выглядит неповрежденным. Исследуемая часть мишени была разрезана на несколько образцов, как показано на рисунке 7. С помощью микроскопа Axiovert 40 MAT рассматривались как продольные (вдоль оси мишени), так и поперечные (поперек оси мишени) сечения полученных образцов.

Результаты постопытного металлографического анализа образцов, вырезанных из центральной части, свидетельствуют о развитии процесса откольного разрушения неравномерно по азимутальному углу и в продольном направлении. Так, поперечное сечение образца № 2 (см. рисунок 8а) демонстрирует наличие двух магистральных трещин, сформированных за счет слияния множества микропор, разделенных областью, содержащей небольшое количество микродефектов. Поврежденность в этой центральной области (см. рисунок 8в,д) состоит из множества микропор, а также полостей, сформированных слившимися порами и достигающих размера ~ 100 мкм и более.

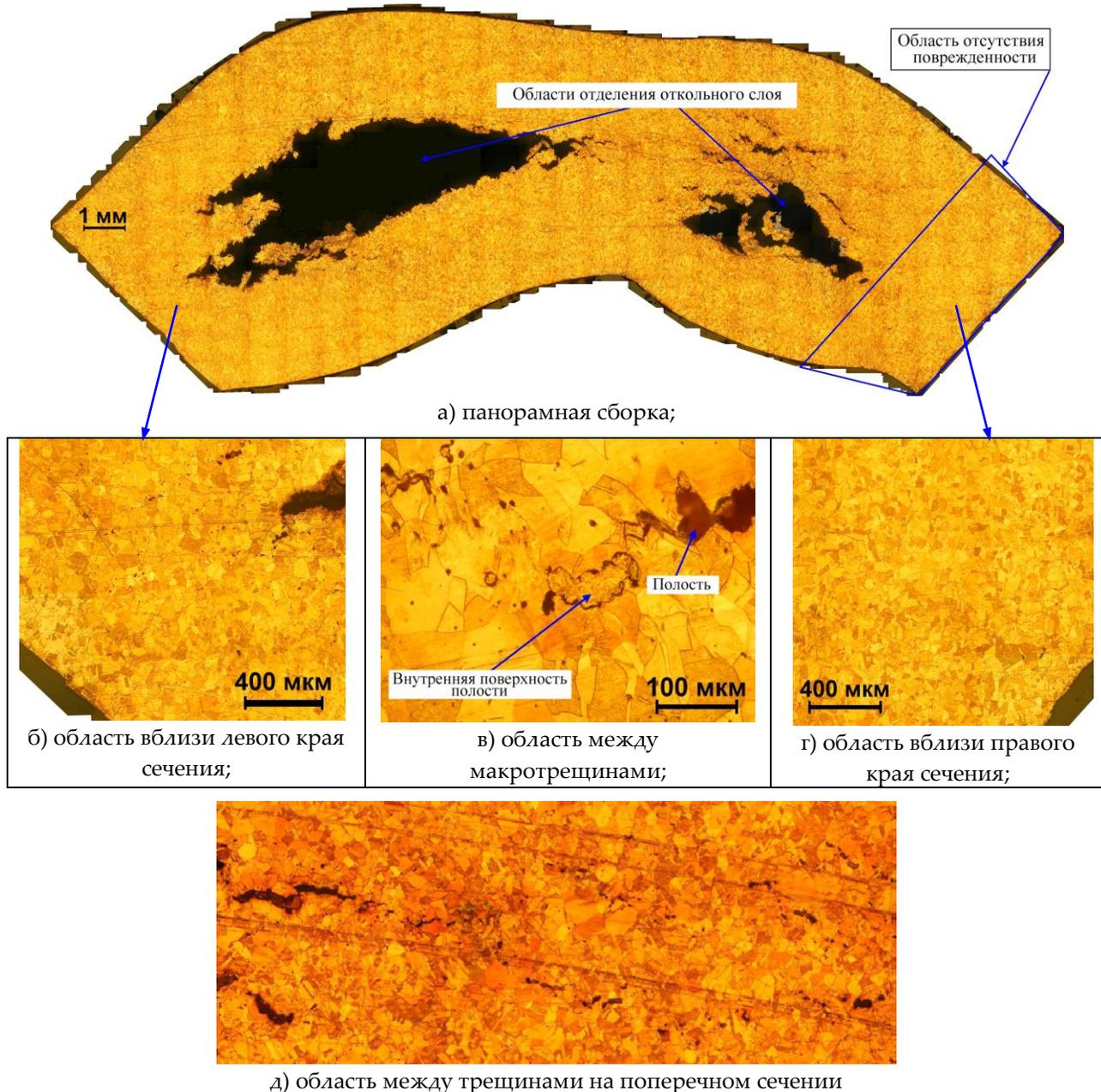


Рисунок 8. Макро- и микроструктура поперечного сечения образца № 2 (нагружаемая поверхность - сверху)



Рисунок 9. Микроструктура меди [10] (соударение плоских пластин, амплитуда ударной волны ~2 ГПа)

Вблизи поверхностей магистральных трещин на поперечном сечении образца № 2 также наблюдается множество микропор (средний размер $20 \div 60$ мкм). Преобладающим является внутризёрненное положение отдельных микропор, однако встречается и межзёрненное их зарождение и развитие. Таким образом, в рассматриваемом поперечном сечении наблюдается классический для крупнозернистой меди вязкий характер откольного разрушения [10], [11] (см. рисунок 9, где представлено фото поперечного сечения плоского образца высокочистой меди, испытанного по методу соударения; растягивающие напряжения действовали в направлении, параллельном оси заготовки-прутка). Однако степень разрушения по азимутальному углу в рассматриваемом сечении существенно неравномерна. В частности, вблизи левого края рассматриваемого сечения наблюдаются лишь отдельные дефекты (см. рисунок 8б), в то время как в области, расположенной между его правым краем и границей правой магистральной трещины, не обнаружено ни одного дефекта микроструктуры откольного характера (см. рисунок 8г). Т.е. поврежденность в этой области не сформировалась.

В свою очередь, развитие процесса разрушения в направлении, параллельном оси мишени, иллюстрируется на примере продольных сечений образцов № 1, № 3 и № 4. Как видно из фото на рисунке 10, распределение степени поврежденности (разрушения) вдоль оси цилиндрической мишени также существенно неоднородно. Магистральные трещины, наблюдаемые на поверхности шлифов образцов № 1, № 3, № 4, характеризуются различным расстоянием между «берегами», их максимальное раскрытие наблюдается на нижнем крае рассматриваемых сечений. При этом в образце № 3 трещина переменной толщины распространяется по всей длине сечения (см. рисунок 10б), а в образце № 4 трещина «сужается» и «распадается» на небольшое количество отдельных трещин, размеры которых постепенно уменьшаются (см. рисунок 10в).

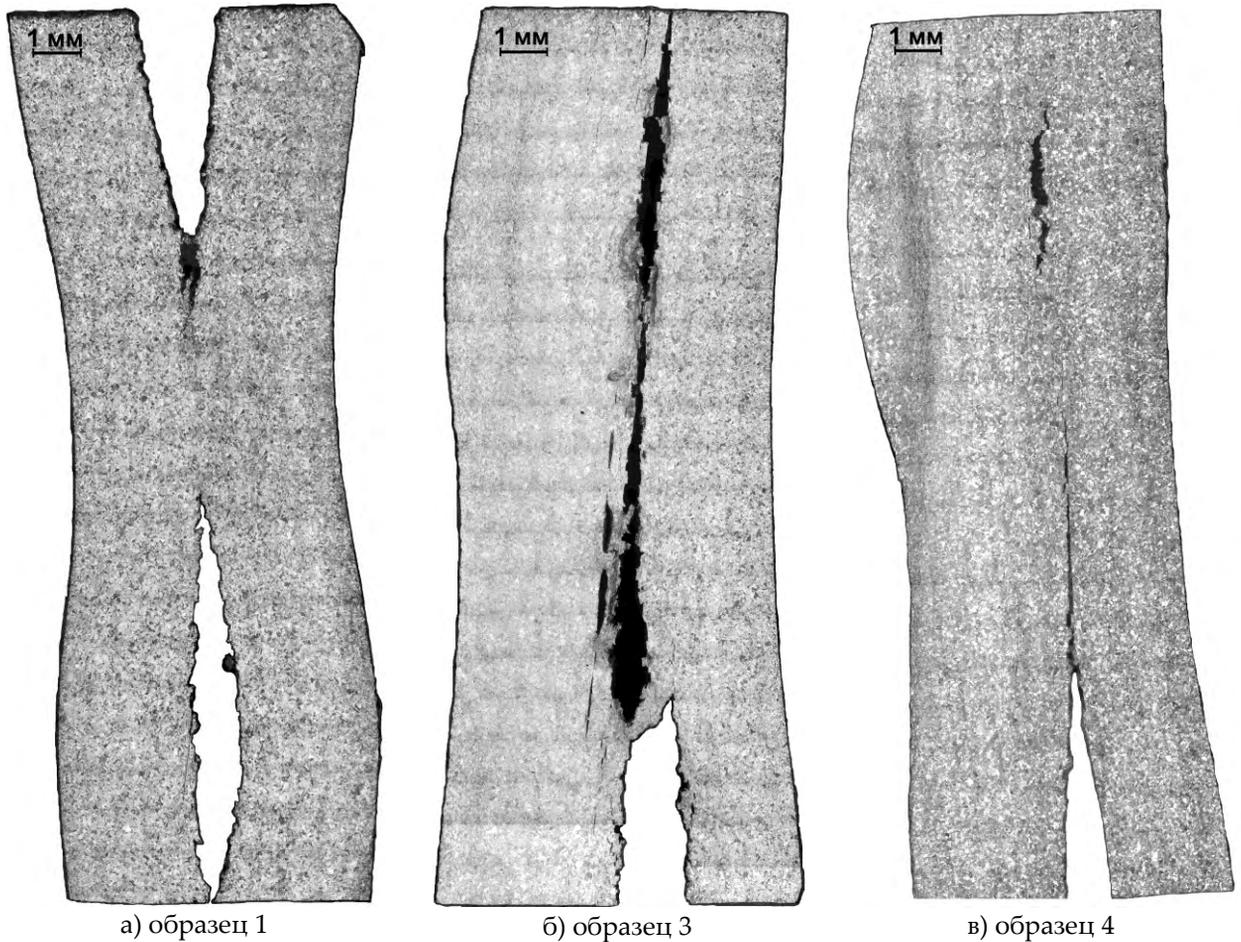


Рисунок 10. Продольные сечения образцов, вырезанных из центральной части (нагружаемая поверхность – справа)

Фото микроструктуры, представленные на рисунке 11а,б, свидетельствуют, что развитие магистральных трещин в продольном направлении происходит за счет слияния пластичных «микротрещин». Эти «трещины» формируются из множества микропор сферической и эллипсоидальной формы (размером $\sim 10 \div 20$ мкм), образующих «строчечные дефекты», ориентированные вдоль оси мишени – см. рисунок 11в,г. Наиболее вероятный механизм слияния этих пластичных «микротрещин» – образование полос локализованной деформации между их кончиками. В результате поверхности магистральной трещины, отделяющей откольный слой, приобретают «ступенчатую» форму – см. рисунок 10а,б. Аналогичная картина с образованием «ступенчатых» трещин зафиксирована в обеднённом уране [12], обладающем близким к хрупкому характером откольного разрушения в области низкоинтенсивного ударно-волнового нагружения – см. рисунок 12.

Вблизи магистральных трещин на рассматриваемых поверхностях, как и на поперечных сечениях, наблюдается большое количество отдельных микродефектов различной формы и размера, в том числе, эллипсоидальные полости размером 100 – 200 мкм. Эти дефекты распространены в довольно широкой области вокруг магистральных трещин. Большинство микропор сформированы в уже упомянутые «строчечные» дефекты, отсутствующие на поперечных сечениях.

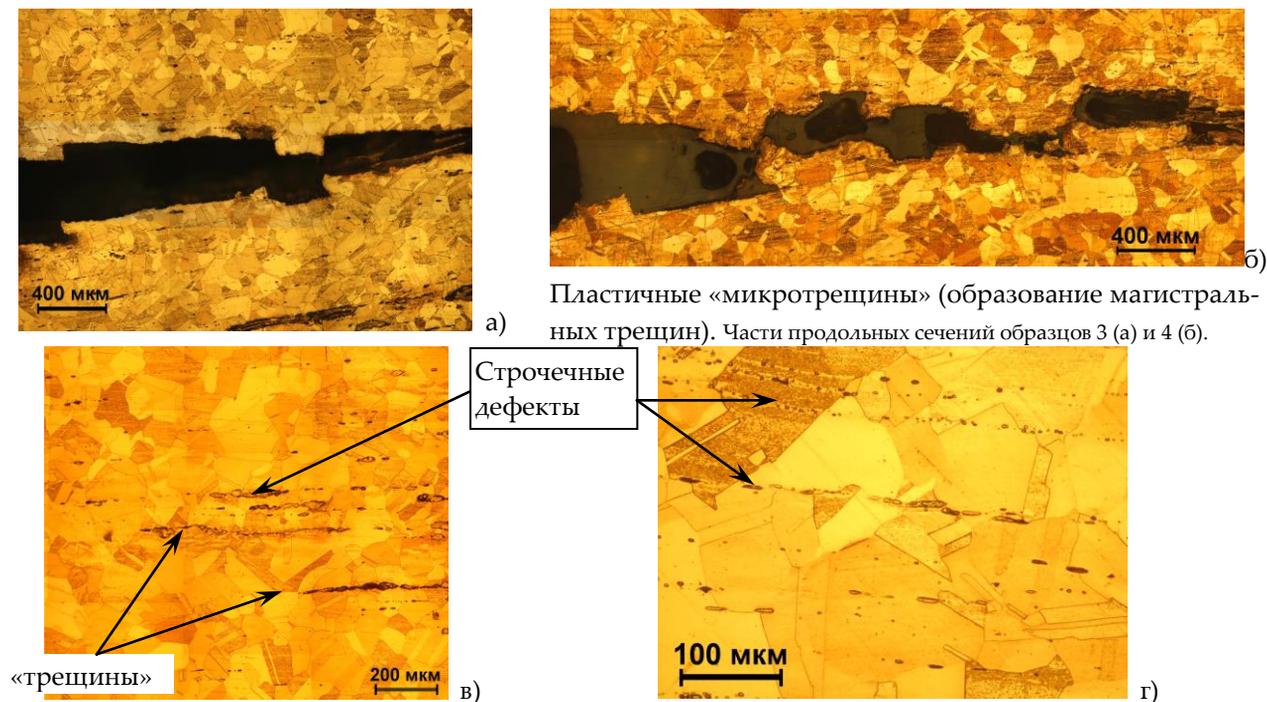


Рисунок 11. Макро - и микроструктура продольных сечении образцов 3 и 4 (нагружаемая поверхность - сверху)

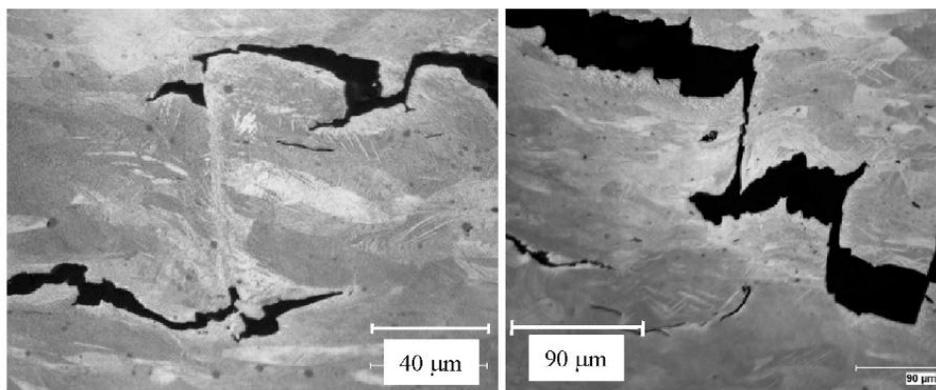


Рисунок 12. Образование полос локализованной деформации между соседними пластичными «микротрещинами» в обеднённом уране [12] (соударение пластин, амплитуда ударной волны ~6 ГПа)

Кроме разрушения за счет действия растягивающих напряжений, в рассматриваемой мишени зарегистрировано начало процесса разрушения на сдвиговых деформациях. Так, на поперечном сечении образца 1 кроме магистральной трещины, отделяющей откольный слой от ответной части, наблюдается область интенсивного пластического течения (см. рисунок 13а). Зерна в этой области значительно деформированы – см. рисунок 13б. Полоса из вытянутых и искривлённых зерен соединяет «кончик» магистральной трещины и внутреннюю поверхность мишени и, вероятнее всего, является предвестником трещины сдвига.

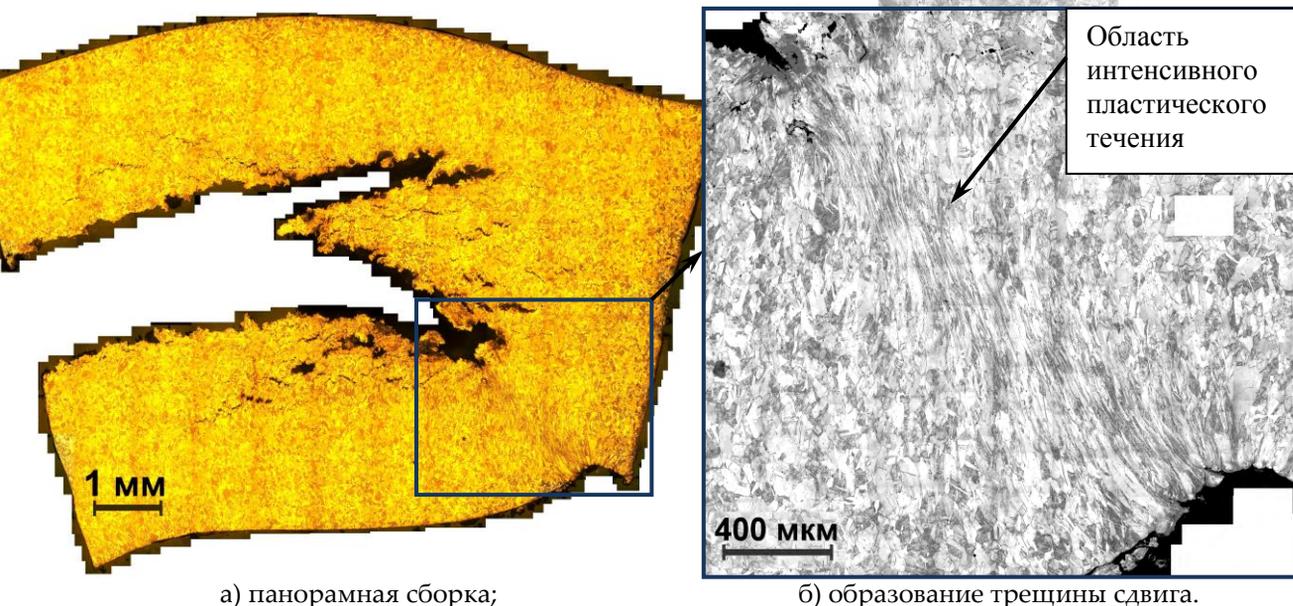


Рисунок 13. Поперечное сечение образца 1

Заключение

В специализированном эксперименте в полой цилиндрической толстостенной мишени исследованы особенности откольного разрушения в меди в условиях, близких к осесимметричному схождению. Постопытный металлографический анализ различных сечений цилиндрической мишени выявил, что распределение степени поврежденности (разрушения) неравномерно как по азимутальному углу, так и в направлении, параллельном оси мишени. Магистральные трещины, отделяющие откольный слой от внешней части мишени, разделены областями неповреждённого материала или областями, характеризующимися наличием относительно небольшого количества микродефектов. Таким образом, в рамках одного эксперимента в мишени зафиксированы все стадии процессов разрушения: 1) зарождение микродефектов в виде сферических и эллипсоидальных пор; 2) слияние пор в микро- и макродефекты различной формы (полости, строчечные дефекты, пластичные «микротрещины»); 3) образование макротрещин; 4) отделение откольного слоя; 5) разрушение откольного слоя на сдвиговых деформациях. Реализация различного уровня разрушения на сдвиге в одной мишени позволяет проследить кинетику этого процесса и, путём численного моделирования, выявить закономерности и количественные характеристики, которые могут быть положены в основу математических моделей.

Выявлена следующая особенность откольного разрушения в меди при нагружении квазиосесимметричной сходящейся волной. На поперечных сечениях мишени процесс разрушения носит явно выраженный вязкий характер: магистральные трещины, отделяющие откольный слой от ответной части, образуются за счет развития и слияния множества сферических микропор. Эта картина полностью аналогична реализующейся в классических опытах по соударению пластин, образцы для которых обычно вырезаются поперек оси прутка-заготовки, а растягивающие напряжения действуют в направлении, параллельном этой оси.

В свою очередь, в направлении, параллельном оси мишени, зарождающиеся под действием радиальных растягивающих напряжений микропоры формируют «строчечные» дефекты и пластичные «трещины» (протяженностью от 200 до 1000 мкм). Образование магистральных трещин происходит за счет слияния этих пластичных «микротрещин», расположенных в соседних плоскостях. Наиболее вероятным механизмом слияния этих трещин является образование полос локализованной деформации между их «кончиками». Таким образом, формирующаяся в полой цилиндрической мишени при квазиосесимметричном схождении область поврежденности обладает более сложной топологией по сравнению с классическими экспериментами, в которых

откол исследуется в плоских образцах в условиях одномерного напряженно-деформированного состояния, что необходимо учитывать в разрабатываемых моделях откольного разрушения.

Авторы выражают благодарность директору ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ д-ру А.Л.Михайлову за инициирование данной работы.

Список литературы

1. А.Г.Иванов, В.Н.Софронов, Е.С. Тюнькин. Особенности осесимметричного схождения откольных слоев в стальных цилиндрических оболочках// ПМТФ, 1984, № 3, с. 125-127.
2. Damage growth and recollection in aluminum under axisymmetric convergence using a helical flux compression generator. А.М.Kaul, А.V.Ivanovsky, О.А. Tyupanova et al. // J.Appl.Phys., 2014, **115** (023516).
3. В.А.Аринин, А.Л.Михайлов, И.В. Шиберин и др. Экспериментально-расчетное исследование квазисферического обжатия медной ампулы при нагружении ее детонацией слоя пластического ВВ // ФГВ. 2015. Т. 51. №5.
4. Особенности зарождения, развития и залечивания откольных и сдвиговых разрушений в оболочках из нелегированного железа и ряда сталей при их сферическом взрывном нагружении. Е.А.Козлов, С.А.Бричиков, Д.М.Горбачев и др. // Препринт, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2007, №229, 26 с.
5. Федоров А.В., Михайлов А.Л., Финюшин С.А. и др. Регистрация параметров множественного откола и внутренней структуры облака частиц при ударно-волновом нагружении металлов // ЖЭТФ, 2016, т. 149, вып. 2.
6. Гаврилов Н.Ф., Иванова Г.Г., Селин В.И. и др. Программа УП-ОК для решения одномерных задач механики сплошной среды в одномерном приближении // ВАНТ, сер. «Математическое моделирование физических процессов», 1982, вып.3, с.11-14.
7. Б.Л.Глушак, С.А.Новиков, А.И.Рузанов, А.И.Садырин. Разрушение деформируемых сред при импульсных нагрузках // Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 1992, 192с.
8. А.П.Большаков, Б.Л.Глушак, П.Н. Низовцев и др. // Сборник трудов «VII Харитоновские научные чтения», Саров, 2005, с.421-426.
9. Б.Л.Глушак, И.Р.Трунин, С.А.Новиков и др. // в кн. «Фракталы в прикладной физике», под ред. А.Е.Дубинова, ВНИИЭФ, 1995, с.59-122.
10. R.Becker, M.M.LeBlanc, J.U. Cazamias. Characterization of recompressed spall in copper gas gun targets // J.Appl.Phys, 2007, **102** (093512).
11. Ю.В.Батьков, Б.Л.Глушак, О.Н.Игнатова и др. // Сборник трудов «VII Харитоновские научные чтения», Саров, 2005, с. 416-421.
12. Koller D.D., Cerreta E.K., Gray III G.T. // DYMAT-2009, European Physical Journal, 2009, V.29, p.1061-1067.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Г.В. Белов, А.П. Гусаров, В.А. Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, В.В. Селиванов, М.Ю. Сотский

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В работе приведены результаты экспериментальных и расчетных исследований динамических механических характеристик сотовых конструкций из алюминиевых сплавов. Образцы для