

05

Методика исследования течения миниатюрной кумулятивной струи из меди

© Н.В. Мелехин, А.М. Брагов, Н.Н. Берендеев, В.Н. Чувильдеев, В.В. Баландин

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603022 Нижний Новгород, Россия
e-mail: melehin@nifti.unn.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2022 г.

В окончательной редакции 13 июля 2022 г.

Принято к публикации 21 июля 2022 г.

Приведено описание новой экспериментальной лабораторной методики изучения течения миниатюрной кумулятивной струи из меди без применения энергии взрыва. Кумулятивная струя сформирована при ударном нагружении цилиндрических образцов с конической выемкой с использованием легкогазовой пушки при скорости удара до 800 м/с. Определены оптимальные параметры испытаний для случая высококачественной меди. Продемонстрировано влияние структурного состояния материала образца на параметры кумулятивной струи (КС). Проведен предварительный анализ влияния чистоты меди и режимов ее обработки на характеристики КС.

Ключевые слова: высокоскоростная деформация, кумуляция, медь, методика, легкогазовая пушка.

DOI: 10.21883/JTF.2022.11.53440.122-22

Введение

Известно, что поведение металла при высокоскоростной деформации определяется как условиями нагружения, так и параметрами микроструктуры материала [1–3], однако методические сложности существенно ограничивают возможность исследования влияния параметров микроструктуры материала на его поведение при динамической деформации. Известен ряд методик исследования явлений, протекающих при динамическом деформировании металлических материалов со скоростями выше 10^3 s^{-1} [1,4]. К ним можно отнести испытание образцов на сжатие, растяжение и сдвиг с использованием разрезных стержней Гопкинсона (РСГ) [4–6], тест Тейлора [7] и исследование поведения материала в кумулятивной струе [8–10], однако практически все приведенные методики направлены на оценку динамической прочности и ограничены в возможности оценки динамической пластичности.

Например, при испытаниях на сжатие образцов в форме шляпы (hat-shaped) с использованием РСГ [6] процесс деформации происходит не во всем объеме материала, а лишь в узкой полосе локализации шириной до $100 \mu\text{m}$. При этом величина деформации ограничена оснасткой, в которой закрепляется образец, и провести корректную оценку величины предельной динамической пластичности невозможно.

В тесте Тейлора реализуются сложные напряженно-деформированные состояния в материале образца, деформация и частичное разрушение протекают параллельно, что затрудняет анализ деформационного поведения [7]. Кроме того, данный метод позволяет определять лишь усредненное напряжение течения, которое прини-

мается равным пределу текучести. Такой подход дает хорошие результаты для материалов, у которых диаграмма деформирования близка к идеально-пластической, но для материалов с высоким модулем упрочнения этот метод дает большую погрешность.

Оптимальной методикой исследований материала при высокоскоростной деформации является анализ поведения материала в условиях течения кумулятивной струи (КС). В этом случае процессы деформации и разрушения протекают последовательно, деформации подвергается весь объем материала струи, однако использование данного метода имеет серьезные методические трудности [11]. Во-первых, необходимость использования взрывчатого вещества (ВВ) существенно снижает доступность данной методики. Во-вторых, высокая скорость фрагментов струи (до 9 км/с) [11] затрудняет возможность получить образец после деформации для исследования микроструктуры с целью анализа кинетики течения материала струи и выявления механизмов пластической деформации.

Для нивелирования указанных недостатков авторами разработана методика формирования КС без применения ВВ. Для этого в образце с кумулятивной выемкой формируется ударная волна (УВ) достаточной интенсивности. В настоящей работе продемонстрирована возможность такого подхода для исследования характеристик КС из меди высокой чистоты.

Целью настоящей работы является создание расчетно-экспериментальной лабораторной методики исследования материала в условиях течения КС без использования ВВ. Данная методика должна позволять проводить сравнительный анализ влияния микроструктуры материала на параметры КС.

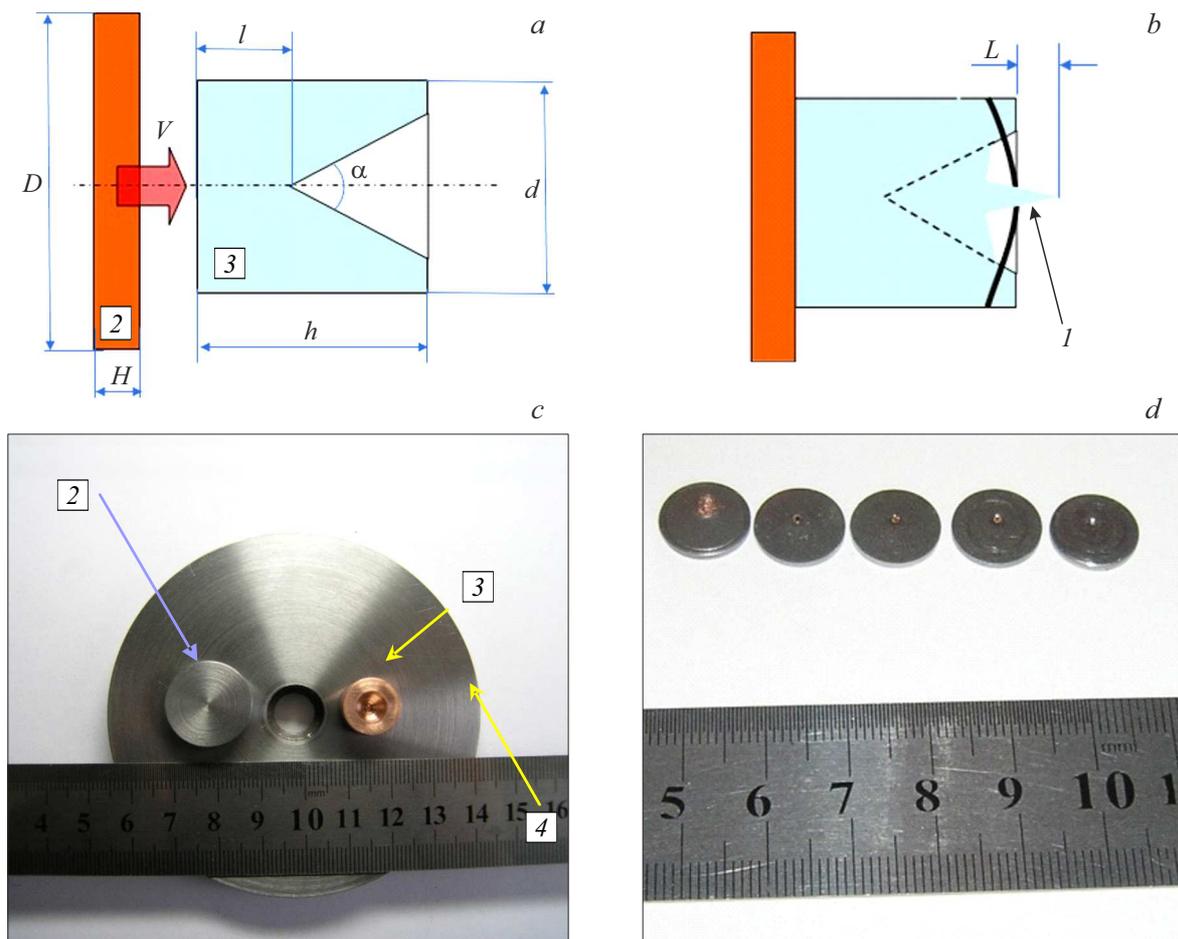


Рис. 1. Схема эксперимента с использованием образца с кумулятивной выемкой: *a* — геометрия образца до нанесения удара, *b* — формирование КС в образце после нанесения удара, *c* — оснастка, ударник и медный образец до испытания, *d* — 5 пробитых мишеней толщиной 1 мм после испытания. 1 — КС, 2 — ударник, 3 — образец, 4 — оснастка.

1. Материалы и методы

Разрабатываемая методика предназначена для исследования течения кумулятивной струи при динамическом нагружении миниатюрных образцов. Методика основана на использовании прямого удара по образцу, один из торцов которого является плоским (по нему наносится удар), а противоположный торец имеет коническую кумулятивную выемку (рис. 1).

Методика реализована на базе легкогазовой пушки ПГ-20. При использовании сжатого гелия пушка позволяет метать образцы массой до 10 g со скоростью до 800 m/s. Исследуемые медные образцы изготавливались с использованием токарной обработки.

В реализуемой методике образцы с кумулятивной выемкой (ОКВ) помещались в стальную оснастку. По плоской стороне образца с помощью ударника, ускоряемого в стволе газовой пушки, наносился прямой удар. В результате удара в образце возникала УВ, приводящая к схлопыванию кумулятивной выемки и образованию КС (рис. 1, 2). Длина струи может измеряться как непосредственно — при помощи высокоскоростной камеры

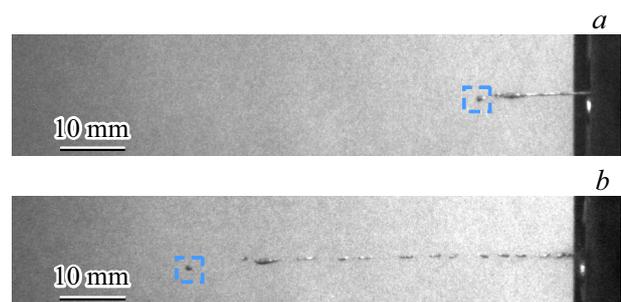


Рис. 2. Высокоскоростная съемка струи. Схема эксперимента показана на рис. 1. При съемке не устанавливалась стальная преграда, и струя имела возможность свободно вытягиваться до разрушения. Головной элемент КС отмечен пунктирной линией. Интервал между кадрами *a* и *b* составляет 16 μ s.

HSFCpro фирмы PCO (рис. 2), так и косвенно — по глубине каверны, пробитой в стальной преграде (рис. 1, *c, d*).

Для изготовления образцов использовались заготовки высокочистой меди марок М0б и М00к. Шероховатость

внутренней поверхности конической выточки после финальной стадии механической обработки не превышала 50 μm .

Для изучения влияния прочностных характеристик материала образца на параметры КС цилиндрические образцы меди подвергались деформации при комнатной температуре с помощью специальной оснастки и гидравлического пресса EU-40 до степени деформации $\sim 80\%$ со скоростью 1 mm/s. Продеформированные образцы подвергались одночасовому отжигу в воздушной печи ЭКПС-10 при различных температурах. После деформации и отжига из полученных заготовок вытачивались ОКВ для проведения испытаний. Твердость образцов определялась при помощи твердомера Struers.

2. Результаты

2.1. Описание методики

Основной характеристикой КС является глубина внедрения в стальную преграду, зависящая от длины струи и ее скорости. Длина струи определяется величиной динамической пластичности материала и условиями проведения эксперимента.

Для увеличения точности определения глубины внедрения с использованием данной методики необходимо обеспечить максимальную длину струи при фиксированных условиях эксперимента. Для максимизации длины формирующейся КС необходимо определить оптимальные параметры системы (рис. 1, а): высоту образца (h), диаметр образца (d), глубину конической выемки ($h-l$), величину угла при вершине конической выемки (α), геометрические параметры ударника (D, H), скорость ударника (V). Указанные параметры определяются путем проведения численных экспериментов.

Для оценки скорости головной части миниатюрной КС проведена высокоскоростная съемка струи в полете. Динамическое нагружение микрообразцов ($h = 6 \text{ mm}$, $d = 13 \text{ mm}$, $h-l = 1 \text{ mm}$, $\alpha = 60^\circ$ (рис. 1)) из меди марки М06 проводилось ударником со скоростью $\sim 600 \text{ m/s}$. На рис. 2 приведены результаты съемки.

Интервал между кадрами составляет 16 μs . Для оценки длины струи использовалась привязка расстояния к количеству пикселей. Наблюдаемая в эксперименте скорость головного элемента струи составляет $\sim 2700 \text{ m/s}$. Данная величина существенно ниже скорости КС, формируемой при использовании ВВ, однако скорость деформации в данном случае сопоставима со скоростью деформации натуральных КС. Для оценки скорости деформации примем начальную длину формируемой в эксперименте с ОКВ струи за длину образующей выемки — 5 mm, конечная длина на момент разрыва струи для меди М06 составляет $\sim 14 \text{ mm}$ при длительности процесса 16 μs . Таким образом, скорость деформации составляет $\sim 10^5 \text{ s}^{-1}$, т.е. сопоставима с оценкой скорости деформации для КС, формируемых из КО с использованием ВВ [12,13].

2.2. Численная оптимизация параметров эксперимента

В качестве инструмента для проведения виртуального эксперимента была использована конечно-элементная система ANSYS WORKBENCH 14.5.7 Academic Research. Для описания пластического деформирования материала стального ударника (сталь 20) была выбрана модель Джонсона–Кука (Johnson–Cook) [14]:

$$\sigma_T = (A + B\varepsilon_p^n)[1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*] \{1 - T_H^m\}, \quad (1)$$

где ε_p — эффективная пластическая деформация, $\dot{\varepsilon}_p^*$ — нормализованная скорость эффективной пластической деформации, A, B, C, n, m — константы модели, T_H — гомологическая температура, задаваемая соотношением:

$$T_H = \frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}}, \quad (2)$$

где T — текущая температура в материале, T_{room} — значение комнатной температуры, T_{melt} — температура плавления материала.

Для описания пластического деформирования меди использовалась модель Стенберга–Гуинана (Steinberg–Guinan) [15]. В этой модели предполагается, что сдвиговой модуль упругости G возрастает при увеличении давления и убывает при увеличении температуры. Данное предположение позволяет моделировать эффект Баушингера. В общем случае, в рассматриваемой модели сдвиговой модуль упругости и предел текучести являются функциями эффективной пластической деформации, давления и температуры.

Указанную выше зависимость описывают следующие уравнения:

$$G = G_0 \left\{ 1 + \left(\frac{1}{G_0} \frac{\partial G}{\partial p} \right) \frac{p}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{1}{G_0} \frac{\partial G}{\partial T} \right) (T - 300) \right\}, \quad (3)$$

$$\sigma_T = \sigma_{T0} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{\sigma_{T0}} \frac{\partial \sigma_T}{\partial p} \right) \frac{p}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{1}{\sigma_{T0}} \frac{\partial \sigma_T}{\partial T} \right) (T - 300) \right\} \times (1 + \beta \varepsilon_p)^n,$$

при условии

$$\sigma_{T0}(1 + \beta \varepsilon_p)^n \leq \sigma_{T \text{ max}}, \quad (4)$$

где η — сжатие, т.е. отношение начального объема к конечному, G_0 и σ_{T0} — значение сдвигового модуля упругости и предела текучести в отсчетном состоянии ($T = 300 \text{ K}$, $p = 0$ и $\varepsilon_p = 0$) соответственно, $\frac{\partial G}{\partial p}$ и $\frac{\partial G}{\partial T}$ — производные сдвигового модуля упругости по давлению и по температуре в отсчетном состоянии, $\frac{\partial \sigma_T}{\partial p}$ — производная предела текучести по давлению в отсчетном состоянии, $\sigma_{T \text{ max}}$ — максимально возможное значение предела текучести, β и n — константы, характеризующие упрочнение.

Параметры моделей определялись расчетно-экспериментальным методом и уточнялись в

Таблица 1. Параметры модели Стенберга–Гуинана для меди (материал ОКВ)

| Параметр | C_1 , m/s | S_1 | G , GPa | Y , МПа | Постоянная упрочнения | Показатель упрочнения |
|----------|-------------------|-------|-----------|-----------|-----------------------|-----------------------|
| Значение | $3.94 \cdot 10^3$ | 1.489 | 47.7 | 90 | 36.0 | 0.45 |

Таблица 2. Параметры модели Джонсона–Кука для стали 20 (материал ударника)

| Параметр | μ | C_1 , m/s | S_1 | C , J/(kg·K) | G , GPa | A , МПа | B , МПа | n | m | T_m , К |
|----------|-------|-------------|-------|----------------|-----------|-----------|-----------|------|-----|-----------|
| Значение | 2.17 | 4569 | 1.49 | 452 | 81.8 | 400 | 275 | 0.36 | 1 | 1811 |

верификационных экспериментах с использованием теста Тейлора. Параметры моделей для рассмотренных материалов приведены в табл. 1, 2.

2.3. Верификация расчетной модели и экспериментальная оптимизация параметров эксперимента

В качестве экспериментально оптимизируемых параметров выступает глубина конической выемки ($h-l$), величина угла при вершине конической выемки (α) и величина расстояния от ОКВ до преграды (f).

Графики зависимости глубины внедрения КС в стальную преграду от величин α , l и фокусного расстояния (f) до преграды из стали 20 приведены на рис. 3, 4. Каждая точка на этих рисунках получена усреднением по результатам трех экспериментов. Испытания проводились при скорости 600 м/с.

Оптимальные параметры эксперимента, позволяющие получить максимальную длину КС при испытаниях медных ОКВ, приведены в табл. 3. Под оптималь-

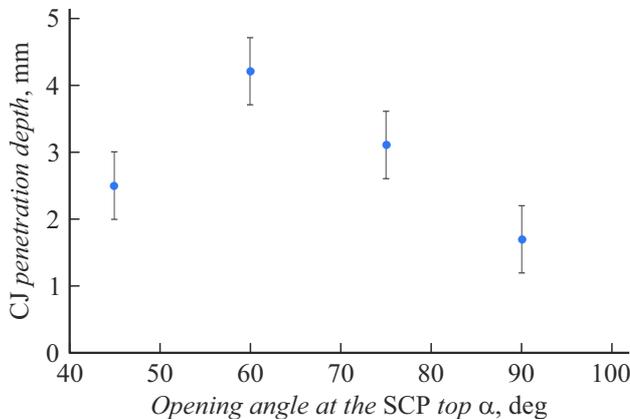


Рис. 3. Зависимость глубины внедрения КС в стальную преграду от величины угла при вершине ОКВ. Образцы из меди марки М0б.

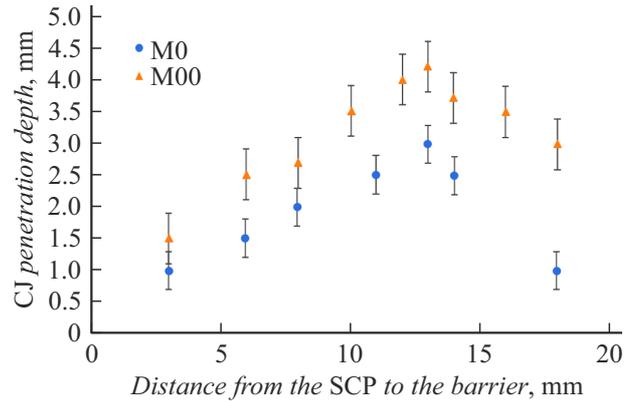


Рис. 4. Зависимость глубины внедрения КС в стальную преграду от расстояния от ОКВ до преграды для образцов из меди марок М0б и М00к.

Таблица 3. Оптимальные параметры эксперимента с ОКВ

| Параметр | Значение |
|--------------------------------------|---|
| Диаметр образца (d) | 13 mm |
| Высота образца (h) | 6 mm |
| Глубина кумулятивной выточки (l) | 5 mm |
| Форма кумулятивной выемки | Конус с углом при вершине $\alpha = 60^\circ$ |
| Фокусное расстояние (f) | 13 mm (~ 2 „калибра“) |
| Диаметр ударника | 19.8 mm |
| Высота ударника | 5 mm |
| Скорость ударника | ~ 600 m/s |



Рис. 5. Фотографии ОКВ после испытаний. Слева — образец из меди марки М0б, справа — образец из меди марки М00к.

ными параметрами подразумевались величины α , $h-l$ или f , соответствующие максимальному значению глубины внедрения КС в стальную преграду.

На рис. 5 приведена фотография ОКВ, изготовленных из меди марок М0б и М00к, после испытаний. Наблюдаемый в нижней части образцов конический выплеск соответствует „песту“ в случае стандартных испытаний кумулятивных облицовок.

Таблица 4. Результаты сравнительных исследований глубины внедрения КС в стальную преграду для меди разных марок

| № образца | Глубина внедрения КС в преграду из стали 20, mm | | | | | | | | | | Среднее |
|-----------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| Медь М0б | 3.0 | 4.0 | 3.0 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.0 | 3.0 | 3.5 | 2.5 | 3.3±0.5 |
| Медь М00к | 4.0 | 4.5 | 3.5 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 3.5 | 4.0 | 4.0 | 3.5 | 3.9±0.5 |

2.4. Применение методики для сравнительной оценки характеристик миниатюрной КС

2.4.1. Повторяемость результатов

Для оценки повторяемости результатов при указанных параметрах испытаний было проведено 2 серии экспериментов, в ходе которых были испытаны 10 образцов из меди М0б (серия 1) и 10 образцов из меди марки М00к (серия 2). Сравнительной характеристикой выступала глубина каверны, сформированной в стальной преграде. В экспериментах использовались параметры образцов и нагружения, приведенные в табл. 3. Результаты испытаний приведены в табл. 4. В ходе эксперимента преграда представляла собой набор пластин толщиной 1 mm. При определении глубины внедрения приняты следующие правила: если пластина имеет входное и выходное отверстие, то к глубине прибавляется 1 mm, если только входное, то 0.5 mm.

Как видно из табл. 4, наблюдается хорошая повторяемость результатов для каждой марки меди.

2.4.2. Влияние механических характеристик материала ОКВ на параметры КС. Медь марки М0б

Анализ представленных в табл. 4 результатов испытаний ОКВ показывает, что образцы, изготовленные из меди марки М00к, имеющей более высокий уровень чистоты, чем медь М0б, имеют более высокий уровень глубины внедрения. Полученный результат свидетельствует о высокой чувствительности устойчивости течения кумулятивной струи к чистоте металла. Можно предположить, что атомы примесей, сегрегирующие по границам зерен меди, затрудняют реализацию эффекта динамической рекристаллизации, который часто рассматривается как один из механизмов обеспечения устойчивого течения КС [8,9].

Для дополнительной проверки чувствительности результатов испытаний ОКВ к параметрам микроструктуры были проведены исследования влияния микроструктуры меди на глубину внедрения КС в стальную преграду. В качестве структурно-чувствительной характеристики использовали твердость. Параметры микро-

Таблица 5. Результаты сравнительных испытаний ОКВ из М0б

| Режим обработки | Твердость, HRB | Глубина пробития стальной преграды, mm |
|-----------------------------|----------------|--|
| 2 цикла РКУП | 64.0 | 2.3 |
| 2 цикла РКУП+раскатка | 56.1 | 2.8 |
| 2 цикла РКУП+раскатка+230°C | 55.6 | 3.8 |
| 2 цикла РКУП+раскатка+280°C | 17.8 | 3.5 |

структуры варьировали за счет изменения степени предварительной деформации и температуры отжига меди. Деформация осуществлялась методом равноканально-углового прессования (РКУП) [16] и осадки цилиндрического образца в гидравлическом прессе. Дополнительно измерена твердость материала ОКВ (HRB при нагрузке 100 kg). Результирующая глубина пробития получена усреднением испытаний трех образцов (табл. 5).

Как видно из приведенных в табл. 5 данных, при одинаковой величине твердости в исходном состоянии материал может демонстрировать разную глубину внедрения КС в материал преграды, при этом существенное снижение твердости не приводит к росту глубины внедрения. Так, снижение твердости с 64 до 56 HRB приводит к росту глубины внедрения струи в преграду с 2.3 до 2.8 mm. Дальнейшее снижение твердости с 56.1 до 55.6 HRB приводит к резкому росту глубины внедрения, а дальнейшее снижение твердости с 55.6 до 17.8 HRB, обусловленное протеканием рекристаллизации, приводит к снижению глубины внедрения до 3.5 mm. Следовательно, для прогноза предельной динамической пластичности недостаточно аттестации прочностных характеристик исходного материала, а необходим анализ связи микроструктуры материала и кинетики его динамического деформирования и разрушения.

Отметим, что полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности разработанной методики испытаний к параметрам микроструктуры меди.

3. Обсуждение и результаты

1. Результаты, приведенные на рис. 4, показывают, что из всех исследованных величин угла при вершине конической выемки наибольшая длина КС наблюдается при величине 60°. Данная величина будет использована в дальнейшем в качестве базовой во всех экспериментах. По нашему мнению, снижение величины угла конуса ОКВ от 90 до 60° приводит к возрастанию скорости головной части КС, однако при этом происходит уменьшение сечения струи, что негативно сказывается на

времени до разрыва [13,16]. При дальнейшем снижении величины угла ОКВ происходит падение глубины внедрения из-за достижения струей сечения, при котором разрушение в процессе вытяжки происходит практически сразу после формирования КС.

Отметим, что полученные экспериментальные результаты качественно совпадают с результатами компьютерного моделирования.

2. Результаты, приведенные на рис. 4, показывают, что, как и в случае стандартной кумуляции, при испытаниях ОКВ существует оптимальное „фокусное расстояние“. Как видно из графика, глубина внедрения вначале растет по мере увеличения расстояния от ОКВ до стальной преграды. Увеличение глубины пробития происходит из-за того, что увеличивается пространство, необходимое КС для вытягивания в режиме высокоскоростного течения; чем длиннее кумулятивная струя, тем больше глубина ее внедрения в стальную преграду. Однако при увеличении длины кумулятивной струи, больше некоторой критической величины, она начинает разрушаться. Вследствие этого, КС воздействует на преграду не как целый объект, а в виде отдельных фрагментов, что и приводит к снижению величины внедрения.

3. Из приведенных в табл. 5 результатов видно, что зависимость глубины внедрения от механических характеристик материала и, следовательно, от параметров микроструктуры носит существенно нелинейный характер. Для установления механизмов влияния структуры и свойств материала ОКВ на глубину внедрения необходимо проведение дополнительных исследований.

4. Анализ представленных в табл. 4 и 5 результатов свидетельствует о том, что зависимость глубины проникновения КС в стальную преграду зависит при прочих равных условиях от двух факторов:

1) чистоты металла, в том числе, чистоты границ зерен;

2) степени предварительной деформации и режимов рекристаллизационного отжига.

Повышение чистоты меди приводит к увеличению глубины внедрения КС в стальную преграду. Изменения микроструктуры и твердости материала, связанные с деформацией и отжигом, оказывают существенное влияние на глубину внедрения струи в стальную преграду.¹ Видно, что эта зависимость носит характер кривой с максимумом, а следовательно, может быть подобран режим термомеханической обработки, позволяющей максимизировать глубину внедрения для конкретного материала.

¹ Авторы не ставили перед собой цель провести детальные исследования влияния микроструктуры меди на ее характеристики бронепробития. Нашей целью являлось разработать методику испытаний ОКВ без применения ВВ и продемонстрировать ее „чувствительность“ к параметрам микроструктуры металла на примере высокочистой меди. Детальному исследованию влияния параметров микроструктуры на глубину проникновения миниатюрной КС в стальную преграду будут посвящены наши будущие работы.

Выводы

1. Разработана экспериментальная методика исследования характеристик миниатюрной КС, позволяющая изучать процессы, протекающие при высокоскоростном деформировании материала. Продемонстрирована эффективность разработанной методики испытаний ОКВ на примере образцов меди различной чистоты.

2. Определены параметры численной модели, позволяющей оптимизировать условия испытаний образцов с коническими выточками. На основании численных расчетов и проведенных испытаний выбраны оптимальные параметры эксперимента с ОКВ.

3. Показано, что наблюдаемые в испытаниях медных ОКВ параметры КС сопоставимы с параметрами реальных КС по скорости деформации и величине размера зерна в материале струи.

4. Показано, что режим деформационной и термической обработки оказывает существенное влияние на характеристики миниатюрной КС. Разработанная методика позволяет в лабораторных условиях проводить сравнительный анализ влияния режимов термомеханической обработки на глубину внедрения КС в стальную преграду и подбирать режимы, обеспечивающие повышение указанной характеристики.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 0729-2020-0060).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.A. Meyers. *Dynamic Behavior of Materials* (John Wiley & Sons, NY., 1994)
- [2] T.X. Yu, Qiu Xinming. *Introduction to Impact Dynamics* (John Wiley & Sons, NY., 2018)
- [3] L. Zhou, H. Wen. *Metals*, **9**, 905 (2019). DOI: 10.3390/met9080905
- [4] B.A. Gama, S.L. Lopatnikov, J.W.Jr. Gillespie. *Appl. Mech. Rev.*, **01**, 223 (2004). DOI: 10.1115/1.1704626
- [5] H. Kolsky. *Proc. Phys. Soc. London, Sect. B*, **62**, 676 (1949). DOI: 10.1088/0370-1301/62/11/302
- [6] M.A. Meyers, H. Pak. *Acta Met.*, **34**, 2493 (1986). DOI: 10.1016/0001-6160(86)90152-5
- [7] G.I. Taylor. *Proc. R. Soc. Lond. A*, **194**, 289 (1948). DOI: 10.1098/rspa.1948.0081
- [8] L.E. Murr, C.-S. Niou, J.C. Sanchez, L.Zernow. *Scripta Metall. Mater.*, **32**, 31 (1995). DOI: 10.1016/S0956-716X(99)80007-7
- [9] L. Zernow, PhD diss. (MD, USA, Johns Hopkins University, 1953)
- [10] W. Guo, S.K. Li, F.C. Wang, M. Wang. *Scripta Mater.*, **60**, 329 (2009). DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.10.028

- [11] D.R. Kennedy. *History of the Shaped Charge Effect: The first 100 years* (Defense Technical Information Center, D.R. Kennedy and Associates, Inc., Virginia, 1990)
- [12] M. Held. *Hydrodynamic Theory of Shaped Charge Jet Penetration* (Schrobenhausen, Messerschmitt-Bölkow-Blohm, 1991)
- [13] Л.П. Орленко (ред.). *Физика взрыва* (Физматлит, М., 2002), т. 2.
- [14] G.R. Johnson, W.H. Cook. *Eng. Fract. Mech.*, **21**, 31 (1985). DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9
- [15] D.J. Steinberg, S.G. Cochran, M.W. Guinan. *J. Appl. Phys.*, **51**, 1498 (1980). DOI: 10.1063/1.327799
- [16] В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов, Д.А. Павлик, В.Ф. Малышев. *Процессы пластического структурообразования металлов* (Наука и техника, Минск, 1994)