

# МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕСТА, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ СХЛОПЫВАНИИ МЕДНОЙ ПОЛУСФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Д. Н. Абдуллина<sup>1</sup>, В. И. Зельдович<sup>1</sup>, И. В. Хомская<sup>1</sup>, А. В. Коваль<sup>2</sup>, Е. В. Шорохов<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

В настоящей работе был выполнен и проанализирован эксперимент по схождению оболочки из меди М1, чистотой 99,96%, имеющей форму, близкую к полусферической (рис. 1). Оболочка (1) была окружена слоем взрывчатого вещества, имеющего форму цилиндра (2). При взрывном нагружении, в результате взаимодействия прямой и отраженной ударных волн, произошел откол (показан штриховой линией на рис. 1). Оболочка при отколе разделилась на две части. Часть оболочки, прилегающая к слою взрывчатого вещества, не сохранилась. Оставшаяся часть сошлась; и был получен пест, имеющий форму двояковыпуклой линзы (рис. 2). Диаметр песта ~45 мм, толщина ~23 мм. На передней поверхности песта (на рис. 2 это нижняя поверхность) образовался остроугольный выступ высотой около 2 мм. Макро- и микроструктурное исследование поперечного и продольного сечений песта показало расположение, форму и размеры откольных пор, а также направление течения (деформацию) материала при схождении [1].

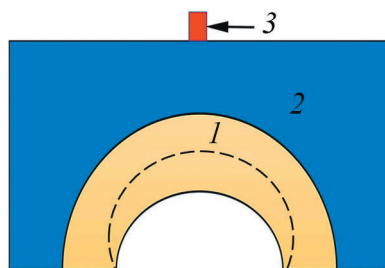


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 – оболочка, 2 – взрывчатое вещество, 3 – электродетонатор

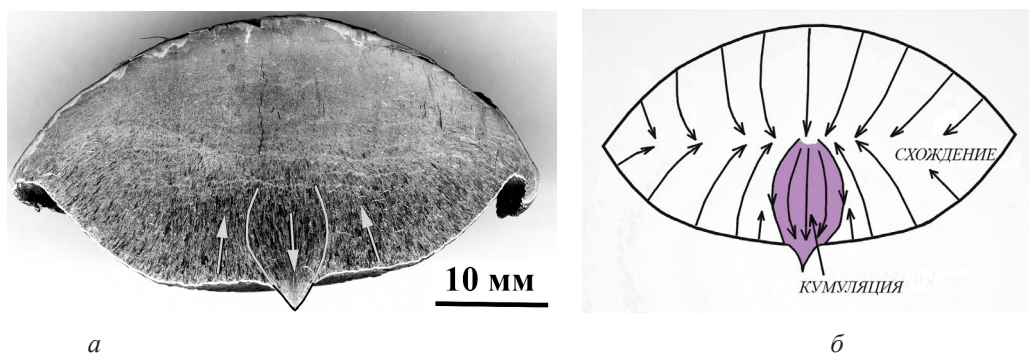


Рис. 2. Макроструктура песта в поперечном сечении (а) и схема течений (б)

На поперечном сечении песта видно, что область откольных пор расположена в передней половине песта (на рис. 2, а это нижняя половина). Поры имеют удлиненную форму. Длина пор достигает 400 мкм, толщина – около 50 мкм. На рис. 2, б представлена схема течений, стрелки показывают направления течений. Течение при схлопывании оболочки направлено вовнутрь к средней (горизонтальной) плоскости песта (рис. 2, б). Это течение (деформация) преобразует (сжимает) оболочку в линзообразный пест. Течение в центре, в передней половине песта (на рис. 2 это нижняя поверхность) направлено в противоположную сторону, наружу, и оно создает остроугольный выступ (выделен цветом). Выступ возникает вследствие высокоскоростной деформации и выброса материала при движении к центру оболочки. Очевидно, что выступ представляет собой участок, возникший на начальной стадии формирования кумулятивной струи.

Исследование структуры песта позволило предложить схему, описывающую процесс схождения. Сложная деформация оболочки при схождении может быть формально представлена в виде двух более простых деформаций, показанных на рис. 3, *а*. Деформация изгибом выпрямляет исходную оболочку (1), превращая ее в тонкий диск (2). Вторая деформация сжимает оболочку в плоскости диска, в результате диаметр диска уменьшается, а толщина увеличивается (3). Данная схема помогает понять, как происходит течение при схождении, но не объясняет образование остроугольного выступа.

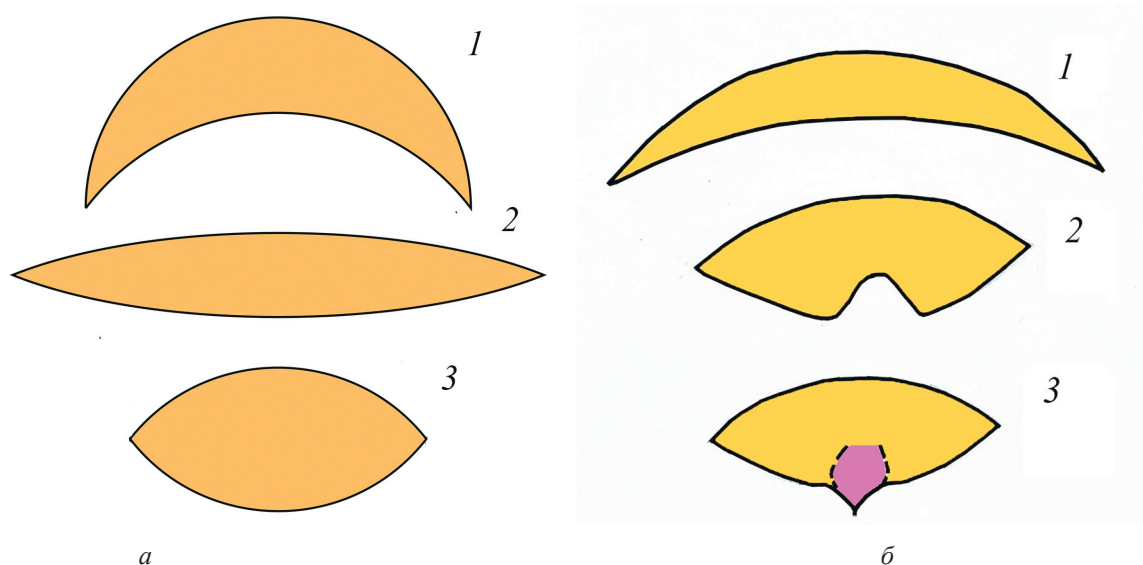


Рис. 3. Формальная (*а*) и реальная (*б*) схемы схождения оболочки

В реальном эксперименте деформации изгиба и сжатия происходят одновременно. На рис. 3, *б* представлена схема схождения, разделенная на этапы. Исходная оболочка (1) распрямляется и преобразуется в диск с выемкой (2). Происхождение выемки можно объяснить либо сохранением части вогнутой поверхности оболочки, либо натеканием материала от периферии диска к центру под действием напряжений сжатия. При дальнейшем сжатии выемка превращается в полость. Полость захлопывается, и материал «выбрасывается», образуя остроугольный выступ (3). Однако, в общем случае образование выемки на поверхности диска не обязательно. Вещество оболочки (медь) движется в плоскости диска к его оси с большой скоростью. Вблизи оси потоки вещества сталкиваются, и происходит выброс. Выброс представляет собой начальную стадию формирования кумулятивной струи. Таким образом, формируется дискообразный пест с остроугольным выступом.

Таким образом, выполненный эксперимент и исследование макро- и микроструктуры полученного песта впервые показали картину деформационных явлений в песте (образование откольных пор и направления течений) на начальной стадии формирования кумулятивной струи.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН (тема «Структура» № 122021000033-2).

### Литература

1. Зельдович, В. И. Металлографическое исследование структуры песта, полученного при схождении полусферической медной оболочки [Текст] / В. И. Зельдович, И. В. Хомская, Д. Н. Абдуллина, А. А. Дегтярев, А. В. Коваль // Физика металлов и металловедение. – 2025. – Т. 126. – № 1.