

## КРИТЕРИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ МАКРОНЕОДНОРОДНОСТЕЙ ТИПА «ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗОНЫ» ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПОРИСТЫЕ СРЕДЫ

Н. А. Костюков, Г. Е. Кузьмин

(Новосибирск)

Ударно-волновое нагружение пористых сред и происходящие при этом физические процессы представляют большой интерес с научной и практической точек зрения. В прикладном аспекте одним из обычных требований к окончательному продукту (заготовке, образцу) является его однородность. Однако многие исследователи отмечают, что при использовании распространенных схем ударного нагружения пористых сред физико-химические изменения в веществе часто протекают неоднородно по его объему [1—11]. Особенно актуальна проблема возникновения макроскопической (относительно характерного размера пористой среды) неоднородности, получившей название «центральной зоны» и представляющей собой либо полость с оплавленными краями, либо уплотненную область, структура и свойства которой существенно отличаются от соседних областей. Довольно часто это наблюдается при нагружении осесимметричных и плоских образцов в условиях столкновения ударных волн (УВ) (рис. 1) или отражения от границ раздела с более плотной средой.

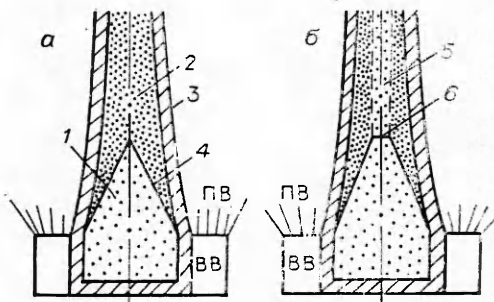
Выводы разных авторов о том, какие параметры нагружения ответственны за возникновение таких неоднородностей, применимы лишь для сравнительно узких диапазонов изменения начальных плотностей и геометрических размеров нагружаемой среды и иногда противоречат друг другу. Для многих работ характерно отсутствие физических моделей явлений, происходящих в процессе ударного нагружения и последующей разгрузки. Экспериментальная информация, описывающая структуру и свойства окончательного продукта, мало способствует созданию приемлемых моделей, а значит, и объяснению механизма возникновения неоднородностей. Поскольку именно такая информация сейчас преобладает, надежная теория, на основании которой можно было бы предсказать условия получения образцов с однородной по всему объему структурой, пока отсутствует. Вместо этого в настоящее время имеется набор различных полумпирических критериев, применимых лишь для решения ограниченного круга конкретных задач.

В настоящей работе рассмотрены известные критерии образования макронеоднородностей типа центральной зоны, установлены границы их возможного применения и предложен метод определения области параметров нагружения, обеспечивающих получение образцов с однородной по всему объему структурой.

1. Имеется большое количество работ (см., например, [1—8]), в которых получение образцов без указанного типа дефектов связывается с требованием, чтобы некоторые параметры нагружения не выходили за пределы найденных опытным путем «разрешенных диапазонов».

Рис. 1. Схемы течения вещества при нагружении сталкивающимися ударными волнами.

а) регулярное отражение; б) нерегулярное отражение. 1 — невозмущенное вещество; 2 — ударно-сжатое вещество; 3 — оболочка контейнера; 4 — фронт падающей ударной волны; 5 — область высокоскоростного потока; 6 — фронт маховой ударной волны.



Часто задача определения оптимальных параметров нагружения сводится к выбору определенных соотношений между массой взрывчатого вещества (ВВ) и нагружаемой пористой среды или оболочки контейнера, в который помещена пористая среда [4—5]. В конечном итоге указанные критерии обуславливают то или иное количество энергии, передаваемой от заряда ВВ к нагружаемому веществу, хотя в указанных работах это обстоятельство не обсуждается. Критерий, предложенный в [5], позволяет при этом учитывать влияние некоторых теплофизических характеристик нагружаемого материала на пороговое значение соотношения масс ВВ и оболочки контейнера.

Наиболее детальные исследования влияния заряда ВВ, материала и толщины стенок контейнера, а также исходных характеристик пористой среды на возможность возникновения макронеоднородностей при ударном нагружении цилиндрических пористых тел проведены в [6]. Резюмируя полученные экспериментальные результаты, авторы делают вывод, что макродефекты возникают по оси образца, когда кинетическая энергия схлопывания стенки контейнера (трубы) превышает некоторое предельное значение, различное для разных прессуемых материалов, но для каждого конкретного материала не зависящее от его исходной плотности.

В работах [7, 8] в качестве критерия возникновения макродефектов приняты определенная скорость детонации заряда ВВ или давление во фронте детонационной волны (ДВ), пропорциональное скорости детонации.

Анализ перечисленных работ показывает, что в большинстве случаев факт образования неоднородностей типа «центральной зоны» явно или неявно связывается с большой энергией, передаваемой от заряда ВВ к нагружаемому телу.

Попытки дать физическое объяснение причин образования макродефектов при ударном нагружении пористых сред предпринимались неоднократно [2, 7, 9—14]. В частности, в [2, 7, 9, 10] обсуждаются возможные причины образования осевой полости при прессовании цилиндрических пористых тел. Авторы [2, 9] предполагают, что такая полость может возникнуть вследствие расширения под действием радиальных растягивающих усилий после ударного сжатия. В [7] появление полости объясняется фильтрационными перетоками воздуха из порового пространства в область перед фронтом УВ. Обе гипотезы не объясняют некоторые важные особенности рассматриваемого явления. Известно, например, что при относительно небольшом изменении параметров нагружения возможно резкое качественное изменение структуры центральной зоны: вместо полости с оплавленной поверхностью появляется сплошная область застывшего расплава. Физическая причина образования неоднородности, очевидно, одна и та же, а ее качественное изменение зависит от количественных параметров течения. Гипотезы [2, 7, 9] не могут также объяснить сам факт появления расплавленных зон. Предлагаемое в [7] объяснение, согласно которому оплавление обусловлено теплообменом между разогретой при сжатии воздушной пробкой и уплотняемым веществом, маловероятно ввиду того, что суммарная теплоемкость газовой фазы много меньше теплоемкости расплавленного слоя твердой фазы. Несостоятельность гипотезы [7] для широкого диапазона изменения пористости и амплитуд ударных волн показана в [15].

В работе [10] предполагается, что давление ударного сжатия вблизи оси образца может существенно превышать давление в периферийной области, поэтому степень сжатия вблизи оси для вещества с аномальной ударной адиабатой меньше, чем у периферии. Согласно [10], это служит причиной возникновения осевой полости. Отметим, что в обсуждаемой работе полностью игнорируются обе упомянутые выше характерные особенности, связанные с появлением расплавленных зон. Неясен и механизм образования полости, поскольку материал вблизи оси все-таки сжат по отношению к исходному (не содержащему полости) состоянию, хотя

и в меньшей степени, чем у периферии. Наконец, гипотеза, предложенная в [10], не приемлема для объяснения факта возникновения полости в широком классе пористых сред с нормальной ударной сжимаемостью.

В работах [11, 12] показано, что при ударно-волновом методе нанесения порошка на металлическую основу возможно образование промежуточного подслоя между уплотненным порошком и поверхностью основы, структура которого существенно отличается от структуры основного слоя уплотненного порошка. В [11] это связывается с локальным повышением давления при нерегулярном отражении УВ от поверхности металлической основы, но возможный механизм процесса не обсуждается. В [12] образование подслоя объясняется плавлением порошка за счет тепловыделения, возникающего из-за трения частиц о поверхность основы при нерегулярных режимах отражения. В качестве критерия образования подслоя принимается определенная величина такого тепловыделения. Однако при этом не учитывается нагрев материала за фронтом УВ, что физически неправомечно. Проведенные расчеты показывают [16], что равновесная температура ударного сжатия пористых сред может превосходить температуру плавления (для данного давления) при амплитудах волн, значительно меньших, чем возможные амплитуды маховской ударной волны.

2. Достаточно полную информацию для понимания механизмов образования макронеоднородностей дают результаты комплексных исследований [13—15, 17—19], основанных на сравнении данных импульсного рентгенографирования структуры течения вещества во время ударного сжатия, оптической регистрации расширения вещества в волнах разгрузки и металлографического исследования структуры образцов после ударного нагружения. Полученные данные позволили установить, что наличие макронеоднородностей в сохранных образцах обусловлено нерегулярными режимами отражения ударных волн (см. рис. 1, б).

В [13] возникновение полости с оплавленными поверхностями объясняется частичным выносом вещества высокоскоростным потоком, возникающим за маховской УВ (область 5 на рис. 1, б). Более детальные исследования [14, 18] показывают, что такое объяснение не достаточно полно. Наряду с высокоскоростным потоком существенным отличием состояния вещества за маховской УВ по сравнению с соседними слоями является значительно большее приращение внутренней энергии. При определенных условиях это может привести к плавлению или к испарению вещества в последующих волнах разгрузки [19]. Возможность плавления вещества за маховской волной отмечается также в [20]. Согласно [18], механизм образования неоднородности за маховской волной связан с застыванием расплавов и конденсацией паров на относительно холодных прилегающих слоях, что подтверждают данные металлографических исследований. Кроме того, даже если при разгрузке не изменяется агрегатное состояние, процесс разгрузки части вещества, испытавшей однократное сжатие в маховской волне, протекает иначе, чем в соседних слоях, подвергнувшихся двукратному сжатию в падающей и отраженной волнах. Это также приводит к различию плотности, структуры, физических и механических свойств соответствующих областей в сохранных образцах.

Таким образом, результаты исследований [13—15, 17—19] позволяют сделать вывод, что физический критерий образования макронеоднородностей типа «центральной зоны» совпадает с критерием перехода от регулярного отражения УВ к нерегулярному.

Для реализации регулярного режима отражения УВ определенной интенсивности необходимо, чтобы угол взаимодействия фронта волны с отражающей поверхностью был меньше некоторого критического. В случае симметричного столкновения УВ при фиксированной скорости детонации заряда, генерирующего УВ, величина угла столкновения тем больше, чем больше скорость схлопывания оболочки контейнера, что и создает видимую зависимость условия образования «центральной зоны»

от кинетической энергии оболочки, которая пропорциональна квадрату ее скорости. С другой стороны, в пористых средах критический угол зависит от давления УВ [18, 28], что, в свою очередь, приводит к наблюдаемой зависимости явления от скорости или давления детонации.

Необходимо подчеркнуть, что энергетический подход не учитывает особенностей течения, возникающего в образце при взаимодействии УВ. При этом упускается из виду, что для процессов, происходящих в нагружаемом веществе, важно не только общее количество энергии, полученной от заряда ВВ, но и характер ее распределения по объему. Величина энергии, полученной от заряда, определяется полной энергией, выделившейся при взрыве, а также свойствами материалов контейнера и нагружаемого порошка, но не зависит от режима отражения УВ. В то же время ясно, что распределение полученной энергии по объему нагружаемого вещества существенно зависит от режима отражения. Смена регулярного режима отражения на нерегулярный влечет за собой и перераспределение энергии: одна часть идет по-прежнему на ударное сжатие, а другая, иногда весьма значительная, закачивается в виде тепла в область, сжатую маховской УВ, и идет на формирование высокоскоростного потока. В результате уплотняющий эффект от ударного воздействия оказывается меньше, чем он мог бы быть при регулярном отражении, а дополнительное тепло приводит к возникновению макро-неоднородностей в разогретом объеме, который передает тепловую энергию относительно холодным прилегающим слоям, что оказывает влияние на формирование их структуры.

3. В данной работе для определения положения границы области регулярных отражений использовался метод, описанный в [21]. Расчеты основывались на предположении о малом изменении интенсивности УВ при ее схождении к оси до момента отражения. В основе этого предположения лежит известный факт, что в таком процессе одновременно сосуществуют две тенденции: увеличение интенсивности волны за счет кумуляции энергии и ее затухание из-за диссипативных процессов и волн разрежения, распространяющихся с поверхности образца. Параметры УВ определялись в соответствии с расчетными скоростями схлопывания оболочки и адиабатами ударного сжатия исследуемых пористых веществ [22, 23]. Заметим, что в рассматриваемом диапазоне давлений и плотностей ударные адиабаты не имеют аномального хода.

После определения границы области регулярных отражений можно подобрать такие условия, в которых получение образцов с однородной по всему объему структурой оказывается невозможным, даже если параметры нагружения удовлетворяют существующим энергетическим критериям.

С этой целью проведены исследования ударно-волнового уплотнения металлических порошков в цилиндрических контейнерах. Схема нагружения, плотности исследуемых материалов и размеры контейнеров выбирались близкими к использованным в работе [6]. Внутренние диаметры контейнеров составляли 25 мм, их длина 20 мм. Остальные данные экспериментальных сборок приведены в таблице, где  $\rho$  — относительная плотность (по отношению к монолиту),  $\Delta$  — размер частиц,  $h$  — толщина слоя ВВ,  $D$  — скорость детонации,  $a$  — диаметр области неоднородности. Там же представлены расчетные значения кинетической энергии оболочки в момент схлопывания  $E$  и критические значения энергии  $E_*$ , полученные в [6]. Скорость и кинетическая энергия тонкостенных оболочек рассчитывались в соответствии с [6] по известным результатам метания пластин. Более точные расчеты, выполненные с учетом осевой симметрии задачи по методу, изложенному в [24], показывают, что при отношении толщины оболочки к ее диаметру  $\sim 0,1$  указанное приближение приводит к ошибке в скорости до 15%, а в энергии — до 30%. Таким образом, если необходимо знать истинную энергию движения стенки трубы, следует пользоваться более точными моделями, чем применялась в [6]. Это замечание, однако, еще не ставит под сомнение

качественные выводы, сделанные в [6]. Просто все значения энергии, в том числе и критические, сдвигаются в сторону увеличения на одинаковую относительную величину. Вывод, сделанный ниже на основании экспериментов (см. таблицу) и этих приближенных расчетов, также сохраняет силу.

Результаты металлографических исследований показали, что, несмотря на малые значения энергии схлопывания оболочки, все образцы имели структурные неоднородности вблизи оси уплотненного образца. Характерные фотографии шлифов показаны на рис. 2.

Отметим, что при фиксированном значении  $E$  характер неоднородности и диаметр области неоднородности зависят от исходной плотности вещества (см., например, результаты экспериментов 3, 7 и 8, 9). Этот факт противоречит выводам, сделанным в [6], но имеет разумное объяснение с позиций сформулированного выше физического критерия возникновения неоднородностей. По нашему мнению, одна из причин, по которым авторы [6] пришли к ошибочным выводам, заключается в том, что эксперименты проводились на образцах, длина которых (65 мм) не превышала длины нестационарного участка, т. е. участка, необходимого для выхода ударно-волновой конфигурации на установившийся режим. Полученные данные показывают несостоятельность энергетического критерия, по крайней мере, для области невысоких (докритических по [6]) величин энергии.

Определенный интерес представляло бы попытаться получить, наоборот, бездефектный образец в области значенной энергии контейнера, превышающих критические [6]. Если тип ВВ и толщина заряда фиксированы, соответствующий режим, по-видимому, можно получить при достаточной толщине стенки. В этом случае

Номер эксперимента	Исследуемое вещество		Оболочка контейнера		Взрывчатое вещество			$E \cdot 10^{-4}$ , Дж/м <sup>2</sup>	$E \cdot 10^{-4}$ , Дж/м <sup>2</sup>	$a$ , мм	Характеристика области неоднородности
	материал	$\rho$ , %	$\Delta$ , мм	материал	$\delta_{10}$ , мм	Наименование	$h$ , мм				
1		40,0	$\leq 50$	Cu	2	Аммонит 6НВ	40,0	3,64	2,0	Линия структура с раковинами	
2		40,0	$\leq 50$	Cu	25	»	20,0	4,10	2,0	Полость с оплавленной поверхностью	
3	Cu	40,0	$\leq 50$	Cu	2	Гексоген	4,5	5,25	0,5	То же	
4		40,0	$\leq 50$	Pb	20	Аммонит 6НВ	40,0	3,64	4,0	»	
5		50,0	$\leq 100$	Cu	5	Аммонит + $\text{NH}_4\text{NO}_3$ (1:1)	20,0	2,30	4,0	»	
6	Cu	50,0	$\leq 100$		5	Аммонит 6НВ + $\text{NH}_4\text{NO}_3$ (1:1)	30,0	2,60	2,0	Полость с оплавленной поверхностью	
7	Cu	50,0	$\leq 100$		5	Аммонит 6НВ	40,0	3,70	0,5	Плотная структура без расплавов	
8	Ni	21,3	$\leq 10$	Cu	2	Гексоген	4,5	5,25	0,4	Полость с оплавленной поверхностью	
9	Ni	43,3	$\leq 10$		2	»	4,5	5,25	2,0	Рыхлая малоплотная структура	
10	Ni	43,3	$\leq 10$		1	»	6,0	5,80	0,5	Полость с оплавленной поверхностью	

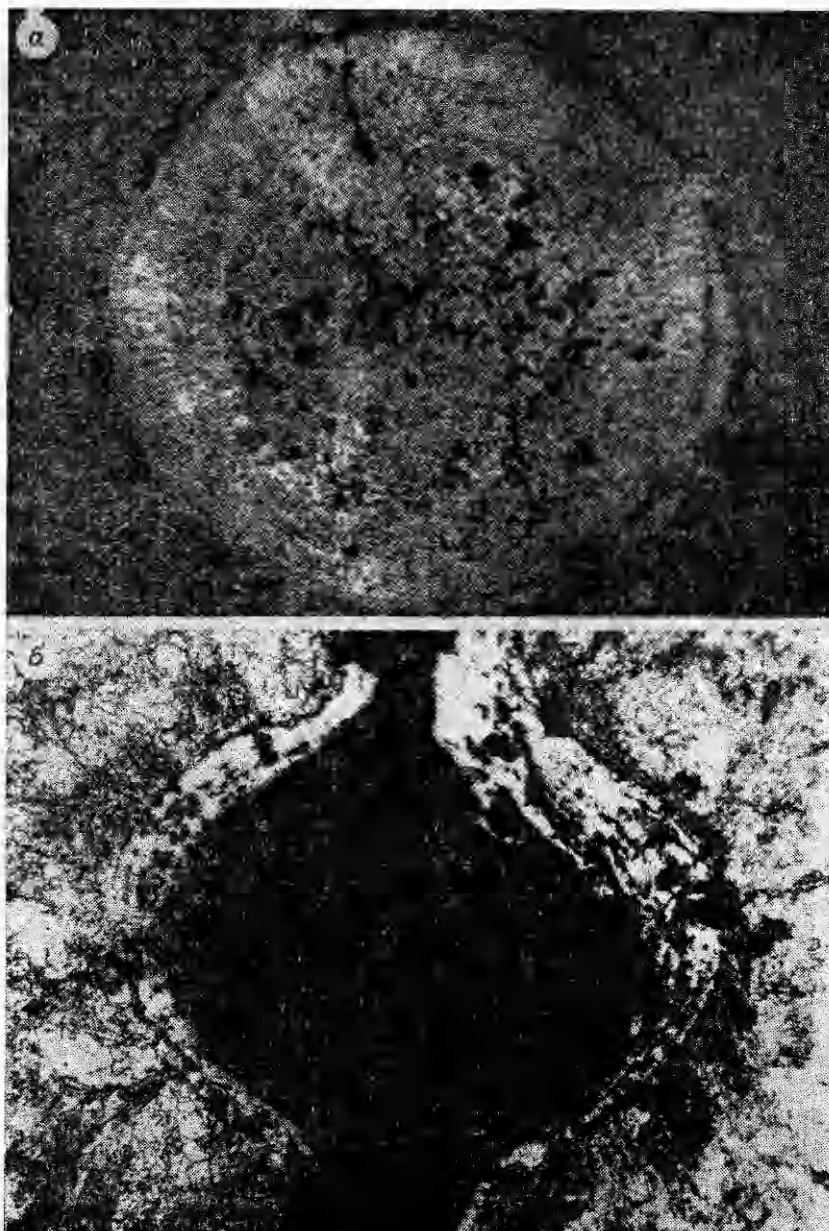


Рис. 2. Характерные фотографии областей структурных макронеоднородностей.  
 а) эксперимент 1,  $\times 40$ ; б) эксперимент 3,  $\times 150$ .

вследствие малого отношения масс ВВ и трубы скорость поворота стенки трубы должна быть мала и формирующаяся в порошке УВ должна подходить к оси под углом, значение которого лежит в области регулярных отражений. В то же время энергия могла бы быть выше критической из-за большой массы контейнера. К сожалению, одновременного выполнения указанных требований добиться весьма непросто. Причина состоит в том, что стенка трубы в процессе движения утолщается [24, 25], следовательно, ее внутренняя поверхность движется быстрее, чем наружная. В случае тонкостенных труб (точнее, для труб с малым отношением исходной толщины  $\delta_{10}$  к диаметру  $d$ ) это различие в скоростях, а значит, и в углах поворота невелико для относительно небольших сжатий. Если же  $\delta_{10}$  сравнима с  $d$ , описанный эффект, как показывают расчеты, проявляется резко и с самого начала движения [26]. В резуль-

тате этого угол наклона УВ в порошке увеличивается и его значение может выйти за границы области регулярных отражений.

Точный расчет движения стенки трубы при взрывном нагружении — задача сложная, требующая учета реальных физических свойств материала трубы. Простые оценки можно сделать для идеального несжимаемого материала [24, 26]. Они показывают, например, что при  $\delta_{10}/d = 0,3$  угол поворота внутренней поверхности трубы в 2 раза, а при  $\delta_{10}/d = 0,8$  в 5 раз может превышать угол поворота внешней поверхности при одинаковом относительном уменьшении ( $\sim 25\%$ ) наружного диаметра во время сжатия. С другой стороны, при  $\delta_{10}/d = 0,02$  эти углы практически совпадают даже при значительно больших степенях сжатия.

Рассмотренный эффект утолщения стенки трубы создает серьезные трудности при определении энергии. Пусть скорость внешней поверхности трубы достигла предельного значения и до момента схлопывания не изменяется. В то же время скорость внутренней поверхности непрерывно возрастает до самого момента схлопывания. В каждый данный момент энергия стенки трубы есть нечто среднее между величинами, рассчитанными по скорости внешней и внутренней поверхностей стенки. Для опытов 2 и 4 (см. таблицу) с толстостенными трубами указаны нижнее значение энергии, вычисленное по формуле [26, 27] для пластины, и верхнее, полученное из оцененной скорости внутренней поверхности. Эти пробные опыты подтверждают, что реализация режима с высокой кинетической энергией и малой скоростью стенки трубы — далеко не простая задача.

При достаточно большой толщине стенки контейнера сжатие, по-видимому, может быть квазистатическим, причем характер течения в порошке может существенно измениться. Это показывает еще один аспект ограниченности энергетического критерия: оказывается важным не просто общее количество энергии, переданной материалу, но и скорость, с которой она передается.

В некоторых проведенных экспериментах в уплотненном образце фиксировалось наличие трещин (рис. 3), происхождение которых связано, по-видимому, с расширением вещества либо в волнах разгрузки, либо при снятии сжимающих напряжений во время разрезания контейнера сохранения для изготовления шлифа. В одних экспериментах трещины имели радиальное направление (рис. 3, а), в других были ориентированы под углом  $\sim 45^\circ$  к радиусу (рис. 3, б). Возможной причиной такой ориентации может служить разная прочность материала после ударного сжатия. В данной работе этот вопрос специально не исследовался, однако совершенно очевидно, что механизм трещинообразования не связан с механизмом возникновения изучаемого здесь типа неоднородностей.

4. Сформулированный выше физический критерий образования неоднородностей типа «центральная зона» не дает сам по себе непосредственного ответа на ряд конкретных практических вопросов. Несколько упрощая реальную ситуацию, можно сказать, что практическая задача взрывного прессования обычно ставится следующим образом: определить, какой требуется заряд (толщина, масса, тип ВВ) и контейнер (материал, масса, размеры), чтобы в результате прессования пористой заготовки получить однородный образец заданных размеров и плотности. Следовательно, с точки зрения приложений любой физический критерий должен быть в конечном счете связан с исходными параметрами нагружения и характеристиками материалов.

В рассматриваемом здесь случае, когда для заданной начальной плотности порошка определены диапазоны параметров [21, 28] (скажем, интенсивности и угла подхода к оси) ударных волн, при которых возможно регулярное отражение, дело сводится к решению обратной задачи об определении исходных условий, обеспечивающих принадлежность параметров падающих волн этим разрешенным диапазонам. Основными критериями качества решения такой задачи являются его физиче-

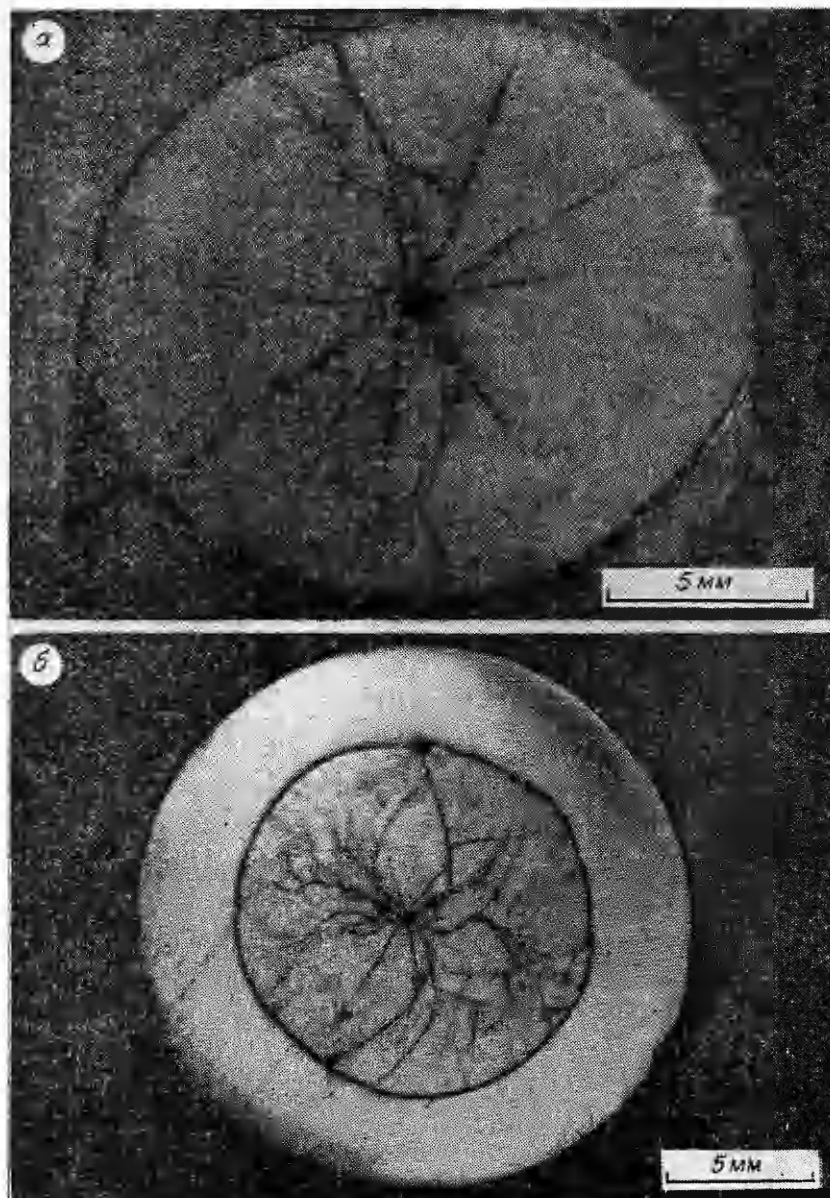


Рис. 3. Характерные фотографии возможных типов трещин.  
а) эксперимент 4; б) эксперимент 8.

ская осмысленность и практическая осуществимость. С другой стороны, относительно невысокая точность и возможная неединственность решения не столь существенны, если разрешенные значения параметров отражения представляются не точкой, а некоторой конечной областью в пространстве параметров.

Даже с учетом сделанных замечаний аккуратная формулировка и решение такой задачи наталкиваются на серьезные трудности. В качестве простейшего подхода можно предложить метод последовательных приближений, основанный на решении ряда прямых задач с некоторыми физически разумными исходными данными.

В любом случае одна из основных проблем в постановке задачи состоит в выборе определяющих соотношений исследуемого материала. Как известно (см., например, [23, 29, 30]), для описания ударно-волнового нагружения пористых материалов (как и сплошных) часто исполь-



зается уравнение состояния Ми — Грюнайзена. Расчеты критических углов перехода к нерегулярному отражению [18, 21, 28] с использованием этого уравнения показали хорошее совпадение с экспериментами [18, 28], где изучалось плоское ударное сжатие алюминия и титана различной исходной плотности. Поэтому в качестве первого шага можно решить полную задачу с таким определяющим соотношением.

Система уравнений установившегося течения в плоской геометрии имеет вид

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} &= 0, \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= 0, \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= 0, \\ u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \frac{p}{\rho} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{p}{\rho} \frac{\partial v}{\partial y} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $x, y$  — декартовы координаты;  $u, v$  — компоненты вектора скорости;  $\rho$  — плотность;  $p$  — давление;  $\varepsilon$  — внутренняя энергия. Для уравнения Ми — Грюнайзена

$$\varepsilon = \varepsilon_x(V) + \frac{V}{\gamma(V)} [p - p_x(V)] \quad (2)$$

( $V = 1/\rho$  — удельный объем;  $\varepsilon_x(V)$ ,  $\gamma(V)$  и  $p_x(V)$  — известные функции) условие гиперболичности системы (1) формально сводится к известному из газодинамики соотношению ( $S$ -энтропия)

$$0 < \left( \frac{dp}{d\rho} \right)_S < u^2 + v^2. \quad (3)$$

В терминах уравнения (2) первое неравенство в (3) можно представить как

$$p > p_x + \frac{V}{\gamma} p'_x - (p - p_x) \left( \frac{V}{\gamma} \right)' \quad (4)$$

Поскольку для всех материалов с нормальными уравнениями состояния

$$p'_x = \frac{dp_x}{dV} < 0, \quad \gamma(V) > 0, \quad \left| \left( \frac{V}{\gamma} \right)' \right| \ll 1,$$

то неравенство (4) выполняется. Тем самым выполняются и оба неравенства (3) (второе — в сверхзвуковой области). Система уравнений (1) имеет, как и в газодинамике три семейства характеристик. На двукратных характеристиках — линиях тока  $udy - vdx = 0$  — выполняются обычное дифференциальное уравнение Бернулли  $udu + vdv + 1/\rho \cdot dp = 0$  и закон сохранения энтропии  $d\varepsilon - p/\rho^2 \cdot d\rho = 0$ .

Легко получить также уравнения и соотношения на двух других характеристиках. Это обсуждение показывает, что систему (1) можно, по-видимому, решать с помощью хорошо развитых численных методов газодинамики.

В литературе (см., например, [31, 32]) имеются указания на то, что режим течения с конической ударной волной и регулярным отражением у оси не может осуществляться в веществах с нормальным уравнением состояния. В связи с этим возникает вопрос, является ли уравнение Ми — Грюнайзена ненормальным настолько, чтобы допускать такой режим и тем самым адекватно описывать имеющиеся экспериментальные данные? Если нет, тогда придется обратиться к более сложным определяющим уравнениям.

В заключение необходимо отметить, что возникновение структурных макронеоднородностей при ударном сжатии пористых сред — процесс, далеко не всегда нежелательный. Например, в некоторых случаях создание узкой зоны литой структуры является мерой повышения прочно-

сти соединения ударно-спрессованного слоя порошка с материалом подложки [11]; существенный разогрев вещества и турбулентный характер течения за фронтом маховой УВ служит причиной увеличения полноты протекания химических превращений при ударно-волновом нагружении реагирующих порошков и т. п.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. A. Prümmer.— In: Proc. 4-th Intern. Conf. of the Center for High Energy Forming. Vail, Colorado, 1973.
2. С. В. Першин, Г. И. Канель. Деп. ВИНТИ № 1446-70.
3. M. A. Meyers, V. V. Gupta, L. E. Murr. J. of Metals, 1981, 3, 21.
4. П. О. Пашков, В. Д. Рогозин.— В кн.: Металловедение и прочность материалов. Волгоград, 1970.
5. Е. Я. Куцовский. Канд. дис. Новосибирск — Ташкент, 1976.
6. A. K. Bhalla, J. D. Williams.— In: Proc. 5-th Intern. Conf. on High Energy Rate Fabrication. Denver, Colorado, 1975.
7. В. А. Косович, А. М. Каунов и др. Физика и химия обработки материалов. 1982, 1, 30.
8. R. A. Prümmer, G. Ziegler.— In: Proc. 5-th Intern. Conf. on High Energy Rate Fabrication. Denver, Colorado, 1975.
9. С. С. Бацанов, А. А. Дерибас. ФГВ, 1965, 1, 1, 103.
10. В. Ф. Анисичкин. ФГВ, 1979, 15, 6, 126.
11. В. Бабуль, Я. Багровский, К. Бережанский. ФГВ, 1975, 11, 2, 259.
12. А. М. Каунов. Порошковая металлургия, 1983, 9, 53.
13. А. А. Дерибас, А. В. Крупин и др. ФГВ, 1973, 9, 6, 883.
14. Н. А. Костюков, А. М. Ставер. ФГВ, 1977, 13, 1, 92.
15. М. П. Бондарь, Н. А. Костюков.— В кн.: Механика быстропротекающих процессов. Новосибирск, 1984.
16. D. J. Pastine, M. Lombardi e. a. J. Appl. Phys., 1970, 41, 7, 3144.
17. А. А. Дерибас, А. М. Ставер. ФГВ, 1974, 10, 4, 568.
18. N. A. Kostjukov.— In: Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals. Proc. Intern. Conf. Albuquerque, New Mexico, 1980.
19. Н. А. Костюков.— В кн.: Нестационарные проблемы гидродинамики (Динамика сплошной среды, № 48). Новосибирск, 1980.
20. M. Wilkins.— In: High energy rate fabrication. The 8-th Intern. Conf. on High Energy Rate Fabrication. San Antonio, 1984.
21. Н. А. Костюков, Г. Е. Кузьмин. ПМТФ, 1985, 1, 121.
22. R. K. Linde, L. Seaman, D. N. Schmidt. J. Appl. Phys., 1972, 43, 8, 3367.
23. С. Б. Кормер, А. И. Фунтиков и др. ЖЭТФ, 1962, 42, 3, 686.
24. А. А. Дерибас, Г. Е. Кузьмин.— В кн.: Динамика сплошной среды, № 8. Новосибирск, 1971.
25. А. Н. Михайлов, Ю. А. Гордополов, А. Н. Дремин. ФГВ, 1974, 10, 2, 277.
26. Г. Е. Кузьмин. Канд. дис., Новосибирск, 1978.
27. Г. Е. Кузьмин.— В кн.: Механика взрывных процессов (Динамика сплошной среды, № 29). Новосибирск, 1977.
28. Н. А. Костюков. ПМТФ, 1977, 3, 124.
29. J. M. Walsh, R. H. Christian. Phys. Rev., 1955, 97, 6, 1544.
30. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1957, 32, 6, 1577.
31. Р. Курант, К. О. Фридрихс. Сверхзвуковое течение и ударные волны. М.: ИЛ, 1950.
32. G. R. Fowles, W. M. Isbell. J. Appl. Phys., 1965, 36, 4, 1377.

*Поступила в редакцию 30/VII 1985,  
после доработки — 1/X 1985*

#### К ТЕРМОПАРНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ МЕТАЛЛОВ

*С. Н. Ишуткин, Г. Е. Кузьмин, В. В. Най*

*(Новосибирск)*

Один из важнейших параметров, характеризующих состояние ударно-сжатого металла, — его температура. Наиболее перспективным из предлагавшихся в литературе методов измерения температуры представляется термопарный метод. Первые попытки использования термоэлектрического эффекта для измерения температуры ударного сжатия приняты в [1] и (по-видимому, независимо) в [2]. Дальнейшее развитие