

дартный пьезоэлемент имел форму диска толщиной 0,3 и диаметром 4,5 мм и размещался для защиты от электромагнитных наводок в тонком металлическом корпусе. Сигналы с пьезодатчиков регистрировались осциллографами типа СУР с рабочей частотой меток 10^7 Гц. Имея в виду малость базы измерения, предполагалось, что средняя волновая скорость совпадает с ее мгновенным значением на середине базы измерения. Координаты середины баз, для которых выполнены измерения волновой скорости D , равны 0,75; 1,25; 2,25; 3,50; 5,00 и 6,50 мм (начало координат совмещено с поверхностью взрыва).

На рис. 3 приведены зависимости волновой скорости от расстояния, пройденного волной. Наиболее вероятная статистическая погрешность определения величины D составляет 2—3%. Как следует из рис. 3, скорость волны в ПММА уменьшается с расстоянием, пройденным волной, т. е. ударная волна затухает. Наиболее сильное затухание ударной волны наблюдается на малых расстояниях от плоскости взрыва, что свидетельствует о кратковременности действия импульса давления на нагружаемой поверхности образца из ПММА.

Результаты выполненных исследований показывают, что осуществление электровзрыва тонкого проводника в контакте с преградой позволяет сообщить ей удельный механический импульс величиной $0,001 \div 0,02$ кг·с/см². При этом максимальные давления в преграде могут достигать величины в несколько десятков кбар.

Поступила в редакцию 26/VIII 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Келлер, Дж. Пеннинг.— В кн.: Электрический взрыв проводников. Т. 2. М.: Мир, 1965.
2. А. Гензер, Д. Вунш, Т. Соунс.— В кн.: Электрический взрыв проводников. Т. 2. М.: Мир, 1965.
3. В. К. Чернышев, В. А. Иванов.— В кн.: Физика импульсных давлений. Тр. ВНИИФТРИ, вып. 44 (74). М., 1979.

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ ЛАЗЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЧАСТИЦ, МЕТАЕМЫХ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ

*В. М. Бойко, Т. П. Гавриленко, В. В. Григорьев,
А. А. Карнаузов, Ю. А. Николаев, А. Н. Папырин*

(Новосибирск)

В настоящее время большое внимание уделяется детонационно-газовому методу нанесения покрытий на различные инструментальные и конструкционные материалы. Перспективность этого метода обусловлена высокими эксплуатационными свойствами покрытий, которые по ряду параметров существенно превышают свойства покрытий, получаемых газопламенным, плазменным, электродуговым и другими методами [1, 2].

Теоретический анализ проблемы детонационного напыления представляет значительные трудности ввиду большой совокупности сложных физико-химических процессов, имеющих место при ускорении двухфазного потока и его взаимодействии с подложкой. В связи с этим особое значение на современном этапе исследования этой проблемы приобретает постановка новых экспериментов, направленных в первую очередь на исследование физических закономерностей взаимодействия дисперсной фазы с нестационарным потоком газа за фронтом детонационной волны, а также измерение основных параметров двухфазного потока, натекающего на преграду. В частности, одной из наиболее важных задач является разработка методики, позволяющей с высокой точностью

и надежностью измерять скорость частиц — одного из параметров, определяющих качество получаемых покрытий [1, 2].

Имеющиеся в литературе данные по скорости частиц в условиях детонационного напыления [3, 4] получены экспериментально методом следаграмм (напыление на установленные параллельно вращающиеся диски с отверстиями). Использование такой методики имеет серьезные недостатки. Главный из них — наличие ошибок измерений, обусловленных взаимодействием высокоскоростного двухфазного потока с измерительной системой, которое может привести к сильному изменению его параметров. Поскольку корректный учет этих факторов представляет достаточно сложную задачу и не рассматривается в цитируемых работах [1—4], достоверность результатов измерения скорости, полученных этим методом, проблематична.

С помощью методов, основанных на регистрации самосвечения частиц на фоне самосвечения продуктов детонации [5], например в режиме фоторазвертки или покадровой съемки, также трудно получить надежную информацию о динамике частиц из-за сложности выделения собственного свечения частиц на фоне интенсивного самосвечения продуктов детонации.

Широкие возможности при исследовании задач, связанных с детонационным напылением, открывает применение методов лазерной диагностики [6]. Основные достоинства этих методов — отсутствие возмущения, вносимого в исследуемую среду, а также высокое пространственное и временное разрешение, что позволяет проводить локальные измерения параметров дисперсной фазы.

В данной работе впервые показана возможность эффективного использования метода многоэкспозиционной лазерной визуализации для регистрации частиц в высокоскоростном, высокотемпературном потоке газа за детонационной волной. Измерены скорости движения твердых частиц в начальной стадии ускорения, зарегистрирован процесс их разрушения при взаимодействии с газовым потоком.

Выбор и описание методики измерений

Рассмотрим некоторые вопросы, возникающие при использовании оптических методов для исследования двухфазных потоков, генерируемых детонационными волнами. Следует отметить, что в последние годы методы лазерной диагностики начинают достаточно успешно применяться в области газодинамики многофазных сред. Лазер-доплеровские измерители скорости (ЛДИС), теневые и интерферометрические методы, голография, метод малоуглового рассеяния света и т. п. позволяют определять широкий круг параметров газовой и дисперсной фазы и могут дать информацию в условиях, когда использование многих традиционных методов измерения в газовой динамике (трубок Пито, термоанемометров и др.) становится невозможным.

При измерении параметров частиц (в частности, скорости их движения V) в потоке газа за детонационной волной возникает ряд дополнительных проблем, обусловленных спецификой изучаемого явления. Эти проблемы связаны в основном с высокой скоростью газовой и дисперсной фазы $V \approx 10^2 \div 10^3$ м/с, малыми размерами частиц порошка $d \approx 10 \div 100$ мкм, используемого для напыления, импульсным характером процесса (характерные времена — $10^{-4} \div 10^{-2}$ с), а также интенсивным собственным излучением продуктов детонации ($T \approx 3000 \div 5000$ К). Для реализации оптических методов диагностики в таких условиях требуется, по существу, создание нового комплекса измерительной аппаратуры с высокой чувствительностью и временным разрешением.

Измерение скорости в диапазоне 10^2 — 10^3 м/с принципиально обеспечивают схемы ЛДИС. Однако, как показано в [7], при их использовании для исследования быстропротекающих процессов возникают зна-

чительные трудности, связанные с необходимостью применения специальных схем регистрации спектра и мощных лазеров, работающих в одночастотном режиме генерации. Более перспективным для решения ряда задач, возникающих при исследовании детонационного напыления, представляется развитие методов лазерной визуализации [6]. Особого внимания заслуживает метод многоэкспозиционной фоторегистрации, основанный на использовании стробоскопического источника света [8]. В отличие от ЛДИС он позволяет получить «мгновенное» (за время $t \sim 10^{-5} \div 10^{-4}$ с) поле скоростей частиц, а также проследить за динамикой движения отдельной частицы в заданной области потока.

Принципиальная схема многоэкспозиционной записи изображения заключается в следующем. На одном и том же фотоматериале с равными интервалами времени Δt регистрируется несколько последовательных сфокусированных изображений движущегося ансамбля частиц. Измеряя расстояния l между двумя соседними изображениями одной частицы, можно легко определить среднюю скорость ее движения на этом участке. Исследуя характер изменения скорости, а также размеров и формы частиц во времени, можно получить достоверную информацию о физических процессах, протекающих при взаимодействии частиц с потоком газа, их соударении между собой и с подложкой и т. д. При большой концентрации дисперсной фазы, когда невозможно отождествить несколько последовательных изображений отдельной частицы, для обработки данных можно успешно применять метод пространственного спектрального анализа, позволяющего определить как среднюю скорость частиц, так и функции их распределения по размерам и скоростям. Эти вопросы подробно рассмотрены в [8].

В данной работе визуализация потока осуществлялась по схеме лазерного «ножа» [6]. Рассеянное частицами излучение регистрировалось под углом 90° . Условие разрешения отдельных частиц радиусом r при заданной концентрации n определяет максимальное значение толщины h светового пучка

$$h \leq 1/n\pi r^2.$$

Минимальный размер частиц r_{\min} задает необходимое значение разрешающей способности формирующей изображение оптики и фотоматериала

$$R \geq 1/r_{\min}.$$

Основная проблема, возникающая при реализации метода многоэкспозиционной фоторегистрации в опытах по детонационному напылению, связана с разработкой мощного источника света, генерирующего серию коротких импульсов с заданной частотой следования. Для получения информации о размерах и форме частицы необходимо, чтобы ее смещение за время экспозиции было меньше ее радиуса r . Это накладывает ограничение на длительность отдельного импульса $\tau_n \leq r/V$ (V — скорость движения частицы). При характерных параметрах $r \approx 50$ мкм, $V \approx 5 \cdot 10^2$ м/с $\tau \approx 10^{-7}$ с. Для измерения скорости в диапазоне $10—10^3$ м/с необходимо также изменять интервалы между двумя соседними импульсами $\Delta t \approx 10 \div 10^2$ мкс.

Очевидно, что выполнить данные требования можно только с помощью импульсных лазеров, например твердотельных ОКГ с периодической модуляцией добротности [9]. В данной работе использовался стробоскопический источник света на основе твердотельного лазера на рубине [8]. Модуляция излучения осуществлялась с помощью ячейки Керра. Лазер обеспечивал генерацию нескольких (от 1 до 50) световых импульсов длительностью $\tau_n \approx 3 \cdot 10^{-8}$ с. Интервалы между ними Δt регулировались в пределах (10—500) мкс с точностью 0,2 мкс. Электронная схема управления давала возможность с высокой точностью ($< 10^{-7}$ с) синхронизировать момент подачи этих импульсов относительно начала исследуемого процесса. Как показали первые опыты, одного генератора

с энергией излучения, приходящейся на один импульс, $W_1 \approx 0,05$ Дж было недостаточно для надежной регистрации изображения частиц на фоне собственного свечения газового потока. Поэтому для увеличения выходной энергии на базе ОКГ типа ГОР-100М собран оптический усилитель (ОКУ). При использовании однопроходной схемы усиления и энергии накачки ~ 9 кДж коэффициент усиления составлял 7—8. На рис. 1 показана характерная форма электрического сигнала, управляющего модулятором (нижний луч), а также импульсы генерации лазерного излучения на выходе ОКУ (верхний луч), регистрируемые с помощью фотоумножителя.

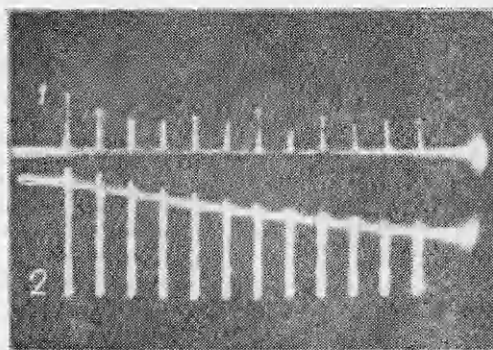


Рис. 1. Осциллограммы.

1 — импульсы генерации лазерного стробоскопа, 2 — сигнал, управляющий модулятором; интервалы между импульсами $\Delta t = 20$ мкс.

с помощью фотоумножителя.

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2. Ее основные элементы: детонационная труба с системами откачки и напуска газа, диагностическая аппаратура для регистрации частиц в потоке газа, а также схема управления и синхронизации.

Детонационная труба представляет собой прямоугольный канал 1 сечением 20×20 мм², состоящий из семи секций длиной по 200 мм каждая. При этом общая длина трубы составляла 1450 мм. Для проведения оптических измерений в двух секциях установлены смотровые окна 2 размером 20×140 мм². Меняя положение этих секций, можно было осуществлять визуализацию потока в любой части трубы. На входной

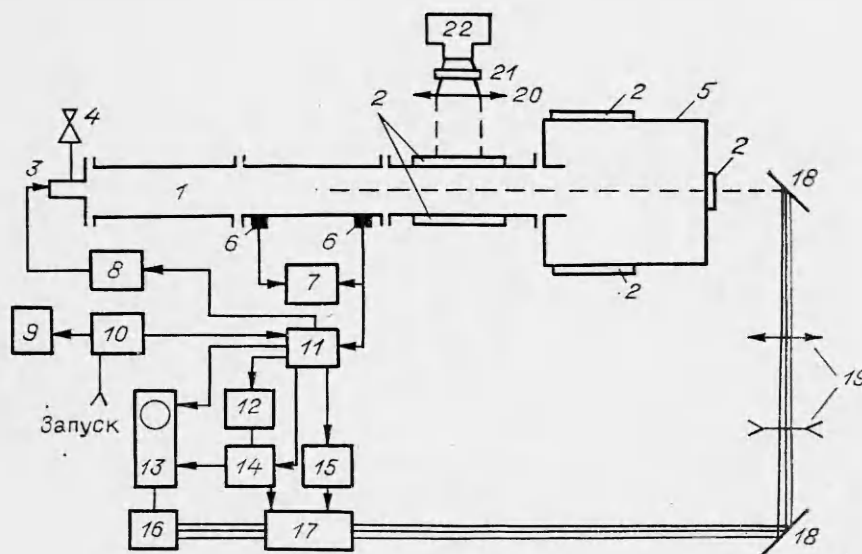


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

1 — детонационная труба; 2 — смотровые окна; 3 — поджигающее устройство; 4 — клапан магистральной для откачки и напуска смеси; 5 — защитный кожух; 6 — пьезодатчики давления; 7 — электронный хронометр; 8 — схема формирования поджигающего импульса; 9 — схема управления запыляющим устройством; 10 — генератор задержанных импульсов; 11—17 — элементы лазерного стробоскопа: 11 — генератор синхронизирующих импульсов, 12 — задающий генератор, 13 — осциллограф, 14 — формирователь высоковольтных импульсов, 15 — батарея конденсаторов и блок поджига ламп накачки, 16 — фотоумножитель, 17 — рубиновый лазер; 18 — поворотные зеркала; 19 — система, формирующая плоский луч; 20 — объектив; 21 — светофильтры; 22 — фоторегистратор.

крышке, закрывающей канал, размещалась свеча 3, поджигающая смесь, и вентиль 4 для откачки воздуха из трубы и напуска горючей смеси. Другой конец детонационной трубы на время откачки и напуска смеси закрывался крышкой, которая удерживалась с помощью электромагнита и перед выстрелом сбрасывалась. Введение частиц в поток осуществлялось импульсным методом с помощью электромагнитного ударника, подбрасывающего нужное количество частиц на заданную высоту. Ударник размещался на нижней стенке в одной из секций, имеющей смотровые окна. Со стороны выхлопного конца канал сочленялся с защитным кожухом 5, в котором предусмотрена установка стержня с закрепленной на нем подложкой для напыления. Для наблюдения процесса взаимодействия частиц с подложкой в защитном кожухе также установлены смотровые окна 2. Пьезоэлектрические датчики 6 и электронный хронометр 7 предназначались для измерения давления и скорости детонационной волны, а также запуска диагностической аппаратуры.

Для наблюдения за частицами, ускоряющимися в потоке газа за детонационной волной, применялся метод многоэкспозиционной лазерной фоторегистрации. Лазерный пучок вводился по оси канала навстречу газовому потоку. Регистрация света осуществлялась с помощью широкоформатной камеры 22 с размером кадра 100×180 мм². Увеличение оптической системы равнялось 1, при этом в поле зрения полностью попадало смотровое окно измерительной секции. Пространственное разрешение передающей изображения оптики было не хуже 50 штр./мм. Для уменьшения влияния собственного излучения продуктов детонации применялась система оптических фильтров.

Система управления и синхронизации обеспечивала необходимую последовательность запуска во времени отдельных элементов установки. Частицы в канал загружались через открытый конец трубы. Канал закрывался крышкой, вакуумировался и затем наполнялся стехиометрической ацетилено-кислородной смесью до атмосферного давления. Открывался затвор фоторегистратора, сбрасывалась крышка с выхлопного торца трубы и запускался ударник, подбрасывающий частицы. Через время 10^{-1} – 10^{-3} с, необходимое для формирования облака частиц с заданной концентрацией, подавался сигнал на вход генератора синхронизирующих импульсов 11. С выходов этого генератора управляющие импульсы с необходимыми задержками поступали на запуск осциллографа, а также на схемы управления ячейкой Керра 14, поджига лампы накачки лазеров 15 и зажигания горючей смеси 8. Задающий генератор стробоскопа 12 запускался сигналом с пьезодатчика давления 6, что обеспечивало точную привязку во времени момента генерации световых импульсов относительно прихода детонационной волны в заданную область канала.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Рассмотрим некоторые экспериментальные результаты, полученные при исследовании двухфазного потока за детонационной волной. Основной целью этих опытов являлась проверка эффективности метода многоэкспозиционной лазерной фоторегистрации для измерения скорости частиц. В опытах использовались сферические частицы бронзы ($d_{ср} \sim 180$ мкм, $\rho = 8,6$ г/см³) и карбида вольфрама марки ВК-25 ($d_{ср} \sim 50, 100$ и 150 мкм, $\rho = 13$ г/см³), которые вводились в поток на расстоянии 20 см от среза ствола. Общее число вводимых частиц составляло 10–20, а их разброс по размерам не превышал 10 мкм. Скорость детонационной волны была 2400 м/с при начальных параметрах смеси $p_0 = 10^5$ Па, $T_0 = 300$ К.

На рис. 3 представлены типичные многоэкспозиционные фотографии движущихся частиц бронзы и карбида вольфрама. Первый импульс генерации лазерного стробоскопа соответствует моменту выхода фронта детонационной волны из ствола установки. Хорошо видно несколько

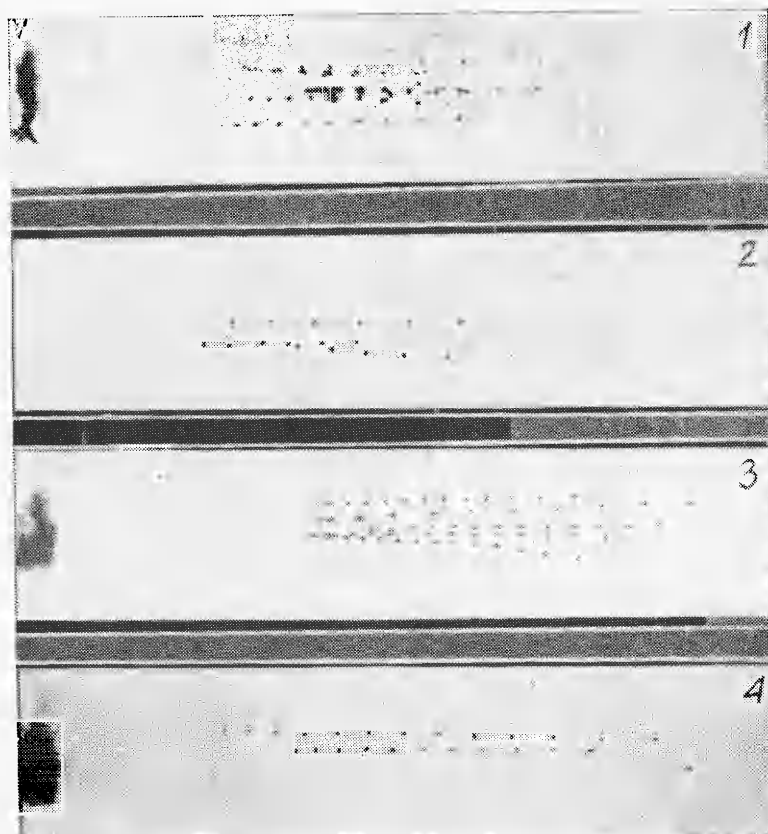


Рис. 3. Многоэкспозиционные фотографии частиц, ускоряющихся в потоке газа за детонационной волной.

1 — частицы бронзы ($d_{\text{ср}} = 180 \text{ мкм}$, $\rho = 8,6 \text{ г/см}^3$), интервалы между импульсами $\Delta t = 100 \text{ мкс}$; 2 — частицы ВК-25 ($d_{\text{ср}} = 155 \text{ мкм}$, $\rho = 13 \text{ г/см}^3$), $\Delta t = 100 \text{ мкс}$; 3 — частицы ВК-25 ($d_{\text{ср}} = 100 \text{ мкм}$, $\rho = 13 \text{ г/см}^3$), $\Delta t = 50 \text{ мкс}$; 4 — частицы ВК-25 ($d_{\text{ср}} = 50 \text{ мкм}$, $\rho = 13 \text{ г/см}^3$), $\Delta t = 50 \text{ мкс}$.

последовательных изображений каждой частицы, позволяющих легко определить среднюю (за время между двумя экспозициями) скорость ее движения и тем самым проанализировать характер ее ускорения на значительном участке ствола. Погрешность при вычислении обусловлена ошибками в измерении положения частицы $\delta l \approx d_r \approx 100 \text{ мкм}$ и времени $\delta(\Delta t) \sim 0,2 \text{ мкс}$. При $\Delta t \geq 20 \text{ мкс}$ и $l \approx 5 \text{ мм}$ относительная погрешность скорости $\delta V/V = \delta l/l + \delta(\Delta t)/t \leq 3\%$.

На рис. 4 приведены зависимости $V = f(t)$, полученные за один выстрел для пяти частиц карбида вольфрама, имеющих близкие размеры $d = 100 \pm 10 \text{ мкм}$. Видно, что разброс этих кривых $\Delta V/V \sim 20 \div 30\%$ существенно превышает методическую погрешность в определении V для каждой частицы и обусловлен, по-видимому, различием в размере ($\Delta d = \pm 10 \text{ мкм}$) и форме этих частиц. Поэтому при анализе зависимости $V = f(d)$ проводилось большое число опытов и для различных фракций ($d_{\text{ср}} = 50, 100$ и 150 мкм) определялось среднее значение $V_{\text{ср}}$ и ее среднеквадратичное отклонение при обработке большого числа частиц (≥ 100). Результаты этих измерений в начальной стадии движения ($t = 0 \div 600 \text{ мкс}$) представлены на рис. 5 и позволяют отметить некоторые особенности в характере ускорения частиц a . Наибольшее значение a наблюдается в первые 100 мкс после старта частицы и обусловлено потоком газа ($V_{\text{max}} \approx 1100 \text{ м/с}$) [10], движущимся непосредственно за фронтом детонационной волны. При удалении фронта от частицы скорость газа уменьшается, что приводит к уменьшению a . Так, для частицы $d_{\text{ср}} = 100 \text{ мкм}$ $V_{\text{ср}}$ за период $t = 100 \div 500 \text{ мкс}$ увеличивается все-

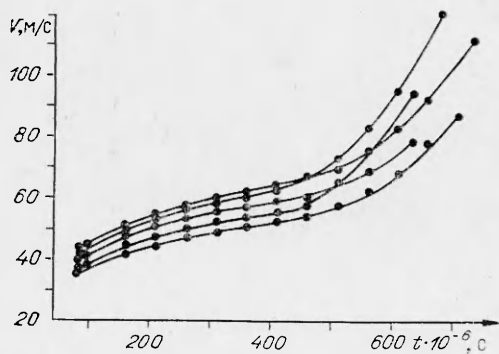


Рис. 4. Зависимости $V = f(t)$ для частиц ВК-25 ($d = 100 \pm 10$ мкм, $\rho = 13$ г/см³).

го в 1,5 раза; через $t \approx 500$ мкс начинается более интенсивное ускорение частиц, которое обусловлено истечением продуктов детонации из ствола при распространении в нем волны разрежения. Максимальное значение $V_{\text{ср}}$, зарегистрированное для частиц $d_{\text{ср}} = 50$ мкм через $t = 600$ мкс, составляет ≈ 130 м/с.

При визуализации потока с частицами карбида вольфрама в более поздней стадии ($t \geq 10^{-3}$ с) обнаружено, что количество треков, регистрируемых на фотографии, в несколько раз превышает начальное число вводимых в поток частиц ($N \approx 10$). Тщательное изучение структуры течения в различные моменты времени позволило установить, что наблюдаемый эффект обусловлен разрушением частиц при их взаимодействии с газовым потоком. На рис. 6 представлены многоэкспозиционные фотографии в более поздней стадии движения частиц (время от момента старта частиц до первой экспозиции на рис. 6 составляет $\sim 1,8$ мс). Хорошо видно, что отчетливое изображение частицы карбида вольфрама как одиночной наблюдается лишь для первых четырех экспозиций. Далее с момента времени t_0 , помеченного на рис. 6 стрелкой, начинается ее распад и в областях, соответствующих последующим экспозициям, отчетливо заметно увеличение числа осколков, образующихся при ее разрушении. Аналогичная ситуация имеет место и для частиц бронзы, однако при этом наряду с отдельными частицами при распаде хорошо

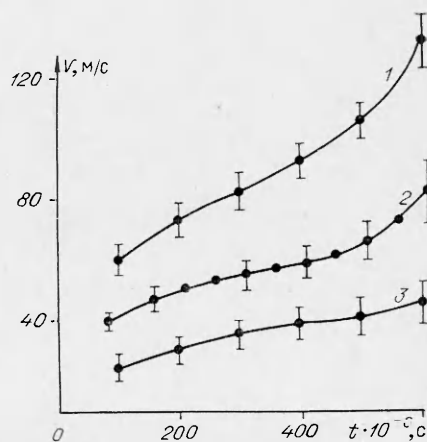


Рис. 5. Зависимость средних значений скорости $V_{\text{ср}}$ для частиц ВК-25 ($\rho = 13$ г/см³) от времени взаимодействия с потоком газа.

1 — $d_{\text{ср}} = 50$ мкм; 2 — $d_{\text{ср}} = 100$ мкм; 3 — $d_{\text{ср}} = 155$ мкм; точки — средневзвешенный разброс скоростей частиц.



Рис. 6. Многоэкспозиционные фотографии, иллюстрирующие процесс разрушения частиц.

1 — частицы ВК-25 ($d_{\text{ср}} = 150$ мкм, $\rho = 13$ г/см³), $\Delta t = 50$ мкс; 2 — частицы бронзы ($d_{\text{ср}} = 180$ мкм, $\rho = 8,6$ г/см³), $\Delta t = 50$ мкс.

видны области, занятые мелкодисперсной фазой. Время от старта частицы до момента времени, при котором начинается процесс их дробления (момент времени t_0), составляет ~ 2 мс.

При наличии дробления конечная скорость дисперсной фазы (в момент соударения с подложкой) будет определяться уже в основном взаимодействием продуктов распада частиц с газом, истекающим из ствола установки после выхода из него детонационной волны. Вероятность воздействия этого механизма на формирование конечных параметров дисперсной фазы (d , V) должна возрастать при увеличении времени пребывания частиц в потоке газа, а следовательно, и при увеличении d и ρ . Не вызывает сомнения необходимость дальнейшего более тщательного изучения основных закономерностей явления разрушения твердых частиц за детонационными волнами, поскольку без учета этого фактора невозможно правильно рассчитать параметры дисперсной фазы, напыляемой на подложку.

Таким образом, проведенные опыты показали, что метод многоэкспозиционной фоторегистрации на основе мощного лазерного стробоскопического источника света может успешно применяться для решения задач, связанных с исследованием динамики частиц, ускоряющихся в высокоскоростном, высокотемпературном потоке газа за детонационной волной.

Поступила в редакцию 2/VIII 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Х. Шоршоров, Ю. А. Харламов. Физико-химические основы детонационно-газового нанесения покрытий. М.: Наука, 1978.
2. А. И. Зверев, С. Ю. Шаривкер, Е. А. Астахов. Детонационное напыление покрытий. Л.: Судостроение, 1979.
3. Ю. А. Харламов, Б. Л. Рябошапко. Порошковая металлургия, 1975, 2, 33.
4. Е. А. Астахов, С. Ю. Шаривкер, А. П. Гарда. Физическая и механическая обработка материалов, 1975, 4, 58.
5. Ю. П. Федько, С. С. Бартенев, Ю. В. Зайцев.— В кн.: Новые методы нанесения покрытий напылением. Ворошиловград: ВМИ, 1976.
6. Н. Н. Яненко, Р. И. Солоухин, А. Н. Папырин и др. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц. Новосибирск: Наука, 1980.
7. В. М. Бойко, А. Н. Папырин.— В кн.: Современные экспериментальные методы исследования процессов тепло- и массопереноса. Ч. 2. Минск: ИТМО АН БССР, 1981.
8. В. М. Бойко, А. А. Карнаухов, В. Ф. Косарев и др. ПМТФ, 1982, 3, 64.
9. А. Т. Кузовкова, Е. В. Нилов, В. А. Русов и др. ЖТФ, 1974, 44, 4, 797.
10. Р. И. Солоухин. Ударные волны и детонация в газах. М.: Физматгиз, 1963.