

УДК 621.793+539.374

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И СОЕДИНЕНИЯ МИКРОЧАСТИЦ С ПРЕГРАДОЙ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

А. П. Алхимов, С. В. Клинков, В. Ф. Косарев

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Представлены результаты экспериментального исследования высокоскоростного (400 – 1200 м/с) взаимодействия сферических алюминиевых частиц с поверхностью. Деформирование частиц исследовалось с помощью микроскопа. Методом статистической обработки получены средние значения степени деформации частиц на образцах, различающихся твердостью (закаленная и незакаленная сталь, медь) и режимом напыления (давление и температура газа в форкамере, рабочий газ). С использованием расчетных значений скорости частиц при соответствующих параметрах получена зависимость степени деформации частицы от скорости удара.

Определение условий закрепления частицы на поверхности является важной задачей, решение которой позволяет выяснить механизмы образования покрытий. При «холодном» газодинамическом напылении закрепление твердых металлических микрочастиц на поверхности преграды происходит при скоростях соударения  $v_{\text{ч}} = 400 \div 1200$  м/с, поэтому исследование взаимодействия частиц и преграды в этом интервале имеет важное практическое значение.

Анализ задачи о деформации частиц при нормальном ударе о поверхность на основании теории размерности позволяет заключить, что возможными параметрами задачи являются  $\rho_{\text{ч}}v_{\text{ч}}^2/H_{\text{ч}}$ ,  $\rho_{\text{ч}}/\rho_{\text{п}}$ ,  $H_{\text{ч}}/H_{\text{п}}$  [1–3], где  $\rho_{\text{ч}}$ ,  $\rho_{\text{п}}$ ,  $H_{\text{ч}}$ ,  $H_{\text{п}}$  — плотность и динамическая твердость частицы и преграды соответственно. Деформация сферических частиц не зависит от их размера, что позволяет моделировать явления удара, выбирая подходящий размер частиц. В этом случае основным требованием, очевидно, является обеспечение одинаковой твердости частиц разного размера, что не всегда легко сделать.

Задачей настоящей работы является изучение деформации частиц, изготовленных из менее твердого материала, чем материал преграды. Твердость материала преграды варьировалась методом термической обработки и подбором различных материалов. Таким образом, в ходе эксперимента определялась роль перечисленных выше параметров.

**1. Экспериментальная установка и методы измерений.** В состав установки входили нагреватель газа, дозатор и сопловой узел. В тех случаях, когда в качестве ускоряющего газа использовался гелий, к установке подсоединялся стандартный баллон с гелием (объем 40 л,  $p_0 = 15$  МПа). Контроль давления в форкамере и дозаторе, а также температуры в форкамере сопла осуществлялся с помощью манометров и термопарного измерителя температуры. Более подробно установка описана в [4]. Во всех экспериментах использовалось сверхзвуковое сопло прямоугольного сечения (размеры критического и выходного сечений  $3 \times 3$  и  $3 \times 10$  мм) с длиной сверхзвуковой части 100 мм. Данное сопло рассчитывалось на число Маха  $M = 2,75$ , но из-за значительной толщины пограничного слоя на стенках сопла реальное число Маха на оси струи на срезе сопла составляло  $M = 2,5$ . Таким образом, давление в форкамере 1,5 МПа обеспечивало истечение расчетной струи.

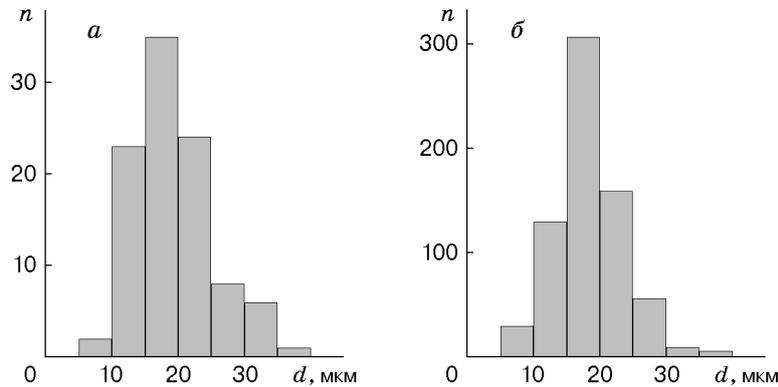


Рис. 1. Функция распределения частиц алюминия:

*a* — по исходным размерам ( $d_{\text{ср}} = 19,4$  мкм;  $sd(d) = 6,1$  мкм;  $s(d) = 0,6$  мкм); *б* — по восстановленным размерам закрепившихся частиц (суммарная по всем образцам) ( $d_{\text{ср}} = 18,35$  мкм;  $sd(d) = 5,15$  мкм;  $s(d) = 0,195$  мкм)

По выходе из сопла двухфазная струя под углом  $90^\circ$  направлялась на преграду, представляющую собой кольцевой магазин, в котором закреплялись образцы в форме цилиндров, один торец которых полировался. Магазин приводился во вращение со скоростью  $\nu = 5 \div 10$  об/мин, что обеспечивало линейную скорость перемещения образцов перед соплом  $v = 2\pi\nu R \ll v_{\text{ч}}$ . Меняя скорость перемещения образцов, можно было получать различное число частиц, закрепившихся на поверхности. Расстояние от среза сопла до поверхности преграды выбиралось в пределах  $15 \div 20$  мм. В качестве материала образцов использовались медь, незакаленная и закаленная сталь марки Ст-45.

Эксперименты проводились с частицами порошка алюминия. Функция распределения частиц  $n$  по размерам  $d$  показана на рис. 1, *a*. Форма частиц была близкой к сферической. С одной стороны, это позволяло точнее вести расчет их ускорения, с другой — сокращало число критериев подобия, что облегчало моделирование удара частицы о подложку и изучение их деформации. На рис. 1, *a* видно, что средний размер частиц составлял 19,4 мкм с узким разбросом.

При проведении экспериментов варьировались давление, температура в форкамере сопла и газ (гелий, воздух), что позволяло получать различные скорости удара частиц о подложку.

**2. Методика измерений.** Для наблюдения частиц и нахождения их размеров использовался оптический микроскоп МБИ с увеличением 1800. На рис. 2 представлена фотография частиц, закрепившихся на подложке.

Для замеров выбирались отдельно лежащие частицы, форма которых в плане была близкой к кругу. Диаметр круга  $D$  оценивался по шкале, совмещенной с окуляром, которая предварительно калибровалась эталоном, расположенным в плоскости объекта. Для измерения высоты частиц над поверхностью использовался эффект малой глубины резкости для короткофокусных объективов микроскопа (примерно 1 мкм для используемого объектива). По разнице между положениями объектива в случаях, когда резко видны поверхность образца и верхняя часть частицы, определялась высота  $h$  закрепившейся частицы над поверхностью. По этим двум величинам в предположении, что закрепившаяся частица представляет собой параболоид вращения, восстанавливался объем частицы, а затем ее первоначальный диаметр:

$$d = (3hD^2/4)^{1/3}.$$

Сравнение функции распределения закрепившихся частиц по восстановленным таким образом диаметрам (см. рис. 1, *б*) с начальной (см. рис. 1, *a*) показало, что с вероятно-

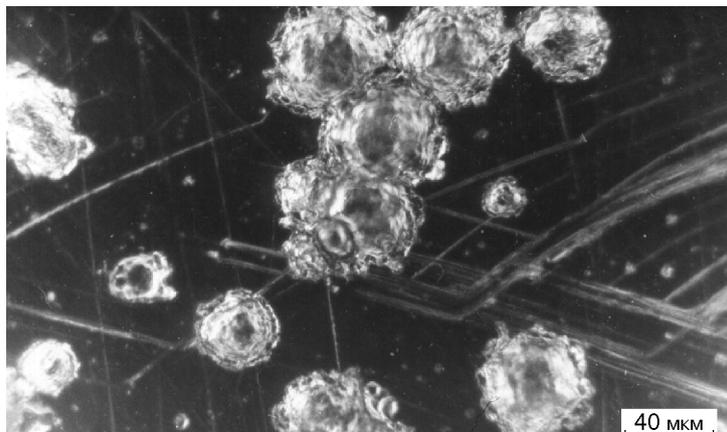


Рис. 2. Фотография частиц алюминия, закрепившихся на медной подложке

стью 95 % мы имеем одну и ту же функцию распределения, и, следовательно, представление закрепившихся частиц в виде параболоида достаточно корректно.

По найденным значениям исходного диаметра частицы находилась степень ее деформации при ударе по формуле

$$\varepsilon = 1 - h/d,$$

где  $h$  — высота закрепившейся частицы;  $d$  — ее исходный диаметр.

**3. Статистическая обработка.** Из-за ошибок измерения, разброса частиц по форме, размерам, скорости и т. д. для получения достоверной информации о степени деформации частиц требуется выполнить большое число измерений и воспользоваться методами статистической обработки. В наших экспериментах для различных образцов это число варьировалось от 50 до 120, что обеспечивало относительную ошибку среднего не более 3 %. Обычная процедура включает определение среднего значения  $\varepsilon_{\text{ср}}$ , величины среднеквадратичного отклонения  $sd(\varepsilon)$  и ошибки среднего  $s(\varepsilon)$ :

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_i^N \varepsilon_i, \quad sd(\varepsilon) = \left( \frac{1}{N-1} \sum_i^N (\varepsilon_{\text{ср}} - \varepsilon_i)^2 \right)^{0,5}, \quad s(\varepsilon) = \frac{sd(\varepsilon)}{\sqrt{N}}.$$

Истинное значение степени деформации с вероятностью 68,3 % находится в интервале  $\varepsilon = \varepsilon_{\text{ср}} \pm s(\varepsilon)$  и с вероятностью 95,5 % — в интервале  $\varepsilon = \varepsilon_{\text{ср}} \pm 2s(\varepsilon)$ .

Кроме того, важно знать, существенно ли различаются два средних значения, найденных при обработке различных образцов, или же их различием можно пренебречь. Для этого используется следующая процедура. Пусть при обработке двух разных образцов, например различной твердости, получены близкие значения степени деформации  $\varepsilon_{\text{ср}1} \pm s_1(\varepsilon)$ ,  $\varepsilon_{\text{ср}2} \pm s_2(\varepsilon)$ . Требуется определить, влияет ли твердость на степень деформации. Для этого находим  $s_{12}(\varepsilon) = (s_1^2(\varepsilon) + s_2^2(\varepsilon))^{0,5}$ ,  $\Delta\varepsilon_{\text{ср}} = |\varepsilon_{\text{ср}1} - \varepsilon_{\text{ср}2}|$ . Если  $\Delta\varepsilon_{\text{ср}} > 2,576s_{12}(\varepsilon)$ , то с вероятностью 99 % эти значения для двух образцов различны, т. е. удастся проследить влияние твердости образцов на степень деформации частицы; если же  $\Delta\varepsilon_{\text{ср}} > 1,96s_{12}(\varepsilon)$ , то с вероятностью 95 % различие несущественно и влиянием твердости можно пренебречь. В случае  $1,96s_{12}(\varepsilon) < \Delta\varepsilon_{\text{ср}} < 2,576s_{12}(\varepsilon)$  необходимо дополнительное исследование.

Следует отметить, что при ускорении частиц струей газа частицы разного размера ускоряются до различных скоростей и, таким образом, могут иметь различную степень деформации. В этом случае определение среднего значения степени деформации по совокупности экспериментальных данных некорректно, так как кроме случайного разброса будет проявляться зависимость степени деформации от скорости частицы. Однако, как

№ образца	$d_{cp}$ , мкм	$sd(d)$ , мкм	$s(d)$ , мкм	$\varepsilon(d_{cp})$	$sd(\varepsilon)$	$s(\varepsilon)$	$\varepsilon$	
							$d = 10$ мкм	$d = 30$ мкм
1	19,8	4,4	0,62	0,37	0,083	0,012	0,29	0,44
2	18,6	3,2	0,46	0,35	0,152	0,022	0,25	0,42
3	18,3	5,2	0,48	0,43	0,085	0,008	0,39	0,45
4	16,3	5,7	0,53	0,44	0,096	0,009	0,41	0,46
5	21,1	4,4	0,70	0,48	0,082	0,013	0,44	0,53
6	20,5	5,0	0,85	0,47	0,078	0,013	0,45	0,48
7	19,6	4,7	0,73	0,52	0,103	0,016	0,44	0,60
8	18,7	5,4	0,62	0,63	0,065	0,008	0,63	0,64
9	17,8	4,6	0,58	0,63	0,077	0,010	0,64	0,63
10	19,6	4,6	0,44	0,72	0,069	0,006	0,66	0,77

Примечание. Образцы 1, 3, 5, 8 — незакаленная сталь; 4, 7, 9, 10 — закаленная сталь; 2, 6 — медь.

показывают исследования [5, рис. 7], зависимость скорости удара частицы от ее размера в исследуемом диапазоне размеров ( $d = 10 \div 30$  мкм) слабая. Поэтому экспериментальные данные можно обрабатывать, находя среднее и проводя сравнение каждого среднего размера частиц с некоторыми средними значениями степени деформации и скорости частицы.

Для нахождения зависимости степени деформации от размера частицы по экспериментальным данным можно использовать линейную регрессию по методу наименьших квадратов, которая, очевидно, будет работать в случае малого диапазона размеров частиц.

**4. Результаты исследований с помощью микроскопа.** Обработка результатов замера большого числа частиц, закрепившихся на одном образце, включала определение первоначального диаметра всех отобранных частиц и степени их деформации. Находились средние значения размера частиц и степени их деформации для данного образца и величины среднеквадратичного отклонения. Эти данные для различных образцов представлены в таблице (графы 1–7). На рис. 3 представлены результаты измерения степени деформации частиц на образце 4 (см. таблицу), где по оси абсцисс отложены их восстановленные диаметры. На рис. 4 показана соответствующая функция распределения частиц по конечным деформациям.

Кроме того, выполнялась линейная регрессия по методу наименьших квадратов (рис. 4). Видно, что при одном и том же режиме ускорения существует слабая, но достаточно заметная тенденция уменьшения степени деформации частицы с увеличением ее диаметра. Вероятно, причиной этого является более низкая скорость у частиц, имеющих больший диаметр (см., например, [5, рис. 7]). По аппроксимирующей прямой находилось ожидаемое значение степени деформации частиц диаметром 10 и 30 мкм. Эти значения в сравнении со средними степенями деформации представлены в таблице (графы 5, 8, 9).

Для повышения достоверности результатов измерения с помощью микроскопа проводились дважды на одном и том же образце. Средние значения и среднеквадратичные ошибки оказались близкими. Например, при измерении частиц на образце 4 получены значения степени деформации  $\varepsilon_1 = 0,45424 \pm 0,01045$  и  $\varepsilon_2 = 0,44216 \pm 0,00878$ , так что  $\Delta\varepsilon_{cp} = 0,012 < 1,96s_{12}(\varepsilon)$ , т. е. две эти выборки принадлежат к одной генеральной совокупности. Таким образом, данная методика измерений позволяет получить достоверные результаты с высокой степенью их воспроизводимости.

Для оценки влияния твердости образцов на степень деформации частиц сравнивались средние значения степени деформаций, полученных при одном и том же режиме ускоре-

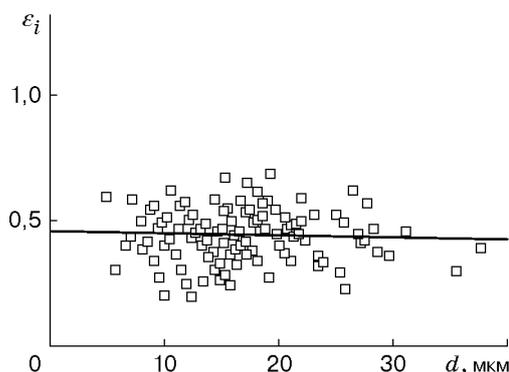


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость степени деформации закрепившихся частиц от их восстановленного диаметра

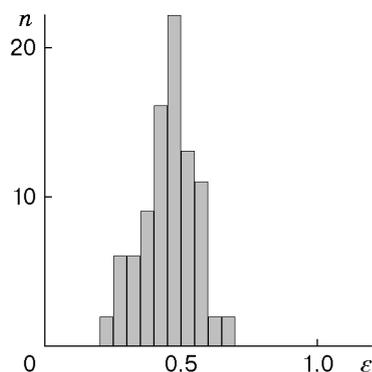


Рис. 4

Рис. 4. Функция распределения по деформациям закрепившихся частиц на образце 4 ( $\varepsilon_{\text{ср}} = 0,45$ ;  $sd(\varepsilon) = 0,099$ ;  $s(\varepsilon) = 0,01$ )

ния по описанной выше процедуре. При сравнении закаленного стального и медного образцов 7 и 6 (см. таблицу) получено  $\Delta\varepsilon_{\text{ср}} = 0,056$  и  $s_{12}(\varepsilon) = 0,021$ , в итоге  $\Delta\varepsilon_{\text{ср}} > 2,576s_{12}(\varepsilon)$ . С вероятностью 99% значения средних степеней деформаций на этих образцах можно считать различными, однако различие это мало (примерно 10%). Сравнение образцов 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6, 5 и 7, 8 и 9 показало, что с вероятностью 95% значения степени деформаций на этих образцах совпадают, т. е. критерии  $\rho_{\text{ч}}/\rho_{\text{п}}$ ,  $H_{\text{ч}}/H_{\text{п}}$  не оказывают существенного влияния на степень деформации закрепившихся частиц, а определяющим критерием является  $\rho_{\text{ч}}v_{\text{ч}}^2/H_{\text{ч}}$ .

Изучение поверхности с закрепившимися частицами под микроскопом показало, что нередко частицы закрепляются кластерами (см. рис. 2), т. е. рядом закрепляется несколько частиц, между которыми трудно провести границу. Возможно, это вызвано более высокой активностью участков поверхности, прилегающих к ранее закрепившейся частице. Таким образом, одиночно закрепившаяся частица является как бы зародышем, от которого начинается рост сплошного покрытия по поверхности образца. При сравнении образцов из стали и меди замечено, что на медном образце при всех режимах ускорения закрепляется большее число частиц.

**5. Зависимость деформации от скорости удара.** По данным таблицы и рассчитанным скоростям частиц найдена зависимость степени деформации частиц от их скорости. Согласно теории размерности степень деформации должна зависеть от безразмерного параметра  $\rho_{\text{ч}}v_{\text{ч}}^2/H_{\text{ч}}$ , а также от отношений  $\rho_{\text{ч}}/\rho_{\text{п}}$ ,  $H_{\text{ч}}/H_{\text{п}}$ . Из представленных выше результатов следует, что зависимостью от последних двух параметров можно пренебречь.

На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости  $\varepsilon$  от  $\rho_{\text{ч}}v_{\text{ч}}^2/H_{\text{ч}}$ . Зависимости, полученные с помощью линейной регрессии, соответствуют частицам с  $d = 10$ , 30 мкм и  $d = d_{\text{ср}}$  (см. рис. 3). На рис. 5 видно, что при одинаковой скорости степень деформации мелких частиц меньше, т. е. динамическая твердость  $H_{\text{ч}}$  мелких частиц выше, чем крупных.

Экспериментальные точки для  $d_{\text{ср}}$  допускают аппроксимацию одной кривой. На рис. 5 сплошной линией показана аппроксимирующая кривая, построенная по результатам, полученным для частиц среднего размера. Отметим, что аналитическое выражение аппрок-

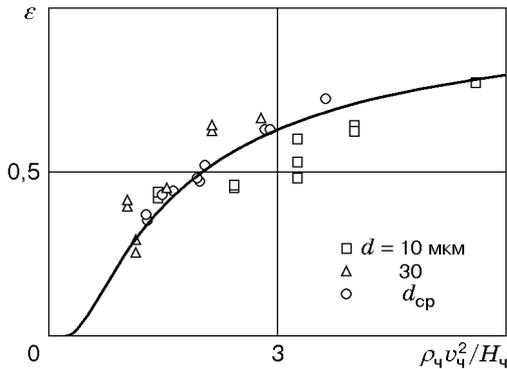


Рис. 5. Обобщенная зависимость степени деформации частиц от скорости удара

симирующей функции

$$\varepsilon = \exp\left(-k \frac{H_{\text{ч}}}{\rho_{\text{ч}} v_{\text{ч}}^2}\right),$$

где  $k = 1,4$ ;  $H_{\text{ч}} = 56 \cdot 10^7$  Па [3], имеет верные асимптотики, поскольку  $\varepsilon \rightarrow 1$  при  $v \rightarrow \infty$ ,  $\varepsilon \rightarrow 0$  при  $v \rightarrow 0$ .

Таким образом, проведены экспериментальные исследования высокоскоростного (400 – 1200 м/с) взаимодействия сферических алюминиевых частиц с поверхностью. С помощью микроскопа изучены формы частиц. Показано, что в исследованном диапазоне параметры  $\rho_{\text{ч}}/\rho_{\text{п}}$  и  $H_{\text{ч}}/H_{\text{п}}$  не оказывают существенного влияния на степень деформации частиц, а определяющим параметром является  $\rho_{\text{ч}} v_{\text{ч}}^2 / H_{\text{ч}}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Витман Ф. Ф., Златин Н. А. О процессе соударения деформируемых тел и его моделировании. 1. Состояние и теория вопроса // Журн. техн. физики. 1963. № 8. С. 982–989.
2. Беяков Л. В., Витман Ф. Ф., Златин Н. А. О процессе соударения деформируемых тел и его моделировании. 2. О моделировании удара шара по полупространству // Там же. С. 990–995.
3. Златин Н. А., Красильщиков А. П., Мишин Г. И., Попов Н. Н. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. М.: Наука, 1974.
4. Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Папырин А. Н. Газодинамическое напыление. Экспериментальное исследование процесса напыления // ПМТФ. 1998. Т. 39, № 2. С. 182–188.
5. Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Папырин А. Н. Газодинамическое напыление. Исследование плоской сверхзвуковой двухфазной струи // ПМТФ. 1997. Т. 38, № 2. С. 176–183.

Поступила в редакцию 3/III 1999 г.