

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МИКРОЧАСТИЦ С СИСТЕМОЙ ПОЛИМЕРНЫХ ПРЕГРАД

Ю. С. Степанов (Москва)

При помощи известного статистического подхода оценивается распределение высокоскоростных стеклянных микрочастиц в потоке по скорости и размерам при одинаковых условиях разгона.

Результаты применяются для изучения взаимодействия микрочастиц с системой полимерных преград из полиэтилена и полиэтилентерефталата. Находятся критические скорости соударения, соответствующие полному переходу частицы в вязко-текучее состояние.

1. Ранее изучалось взаимодействие стеклянных калиброванных сфер плотностью $\rho_0 = 2.7 \text{ г/см}^3$ и диаметром $d_0 = 80 \pm 5, 95 \pm 5, 175 \pm 225 \text{ мкм}$ с тонкими алюминиевыми фольгами и полубесконечными преградами из алюминия и меди [1]. Осциллографическим методом от сигналов с ФЭУ оценивалась скорость v_0 наиболее быстрых частиц в потоке, разогнанном высокоскоростным плазменным сгустком, причем ошибка в ее измерении не превышала 10%. Редакция опыта включила в себя одновременное использование тонкой алюминиевой фольги толщиной $l = 10 \text{ мкм}$ и полубесконечной металлической преграды с известными свойствами, находящихся в одной плоскости с тремя ФЭУ.

При одних и тех же условиях проведения опыта (постоянные начальный размер d_0 и плотность ρ_0 частиц, заданный режим работы электродинамического ускорителя) можно отдельно получить статистическое распределение кратеров в полубесконечной мишени $Q(a)$ и отверстий в фольге $P(d_*)$ (a и d_* — глубина кратера в мишени и диаметр отверстия в фольге соответственно).

По известным зависимостям a/d_0 и d_*/d_0 от v_0 для данной пары ударник — преграда отыскивались соответствующие значения d_0 и v_0 [1].

В данной работе изучалось взаимодействие стеклянных микрочастиц с системой полимерных преград, собранных в пакет, в идентичных условиях проведения опыта. Число слоев в пакете зависело от первоначального размера частиц, толщины каждого слоя и предполагаемой максимальной скорости.

Для предохранения от воздействия плазмы на полимерный материал пакет закрывался спереди конденсаторной бумагой $l = 8 \text{ мкм}$. Исследование взаимодействия высокоскоростных микрочастиц с полимерными преградами различной толщины изучалось ранее в работах [2, 3]. Было найдено, что эффект заплывания сильно влияет на величину отверстия, особенно при малых скоростях соударения v_0 . Вследствие этого с тыльной стороны пакета ставилась алюминиевая фольга $l = 10 \text{ мкм}$, отстоящая от него на некотором расстоянии и служащая индикатором пробоя [2]. В некоторых случаях для уточнения числа пробиваемых слоев пакет ставился на ФЭУ, закрывая половину его экрана перед светонепроницаемой фольгой. Для обработки микрогеометрии поверхностей применялись микроскопы, основанные на действии светового сечения. При диффузном отражении света на полимерных материалах применялись слепки их поверхностей, изготавливаемые из специальной пасты. В опытах применялись пакеты из листов полиэтилена $l = 60 \text{ мкм}$ и полиэтилентерефталата $l = 25 \text{ мкм}$. После откачки воздуха из вакуумной камеры пакет представлял собой несколько находящихся на некотором расстоянии одна от другой преград.

2. При сопоставлении размеров и скорости частиц в одном опыте использовались результаты, полученные в работе [1]. Заметим, что их можно проверить применением известного статистического подхода для нахождения закона распределения случайной функции или ее числовых характеристик [4]. Действительно, в рассматриваемом случае величины d_0 и v_0 являются функциями случайных независимых параметров d_* и a .

Взаимодействие стекло — алюминий в случае полубесконечной преграды оценивалось по известной зависимости $a/d_0(v_0)$ для пары алюминий — алюминий [5].

Зависимость $d_*/d_0(v_0)$ для тонкой алюминиевой фольги при $l/d_0 = 0.125$ (для $d_0 = 80 \pm 5 \text{ мкм}$) определялась в работе [1]

$$a = 0.7 d_0 v_0^{2/3}, \quad d_* = d_0 (1 + 0.125 v_0) \quad (2.1)$$

При этом экспериментальные зависимости для a и d_* справедливы до скоростей $v_0 \sim 10 \text{ км/сек}$, значения a, d_0, d_* вычисляются в мкм , v_0 — в км/сек . Решение (2.1) сводится к системе двух уравнений третьей степени относительно $v_0^{1/3}$ и $d_0^{1/2}$

$$\begin{aligned} v_0 - v_0^{2/3} 5.6 d_* / a + 8 = 0, \quad d_0^{3/2} - d_0^{1/2} d_* + 0.2 a^{3/2} = 0 \\ d_0 = \left\{ \left[-0.1 a^{3/2} + (0.01 a^3 - 1/2 d_*^3)^{1/2} \right]^{1/3} + \left[-0.1 a^{3/2} - (0.01 a^3 - 1/2 d_*^3)^{1/2} \right]^{1/3} \right\}^2 \quad (2.2) \\ u_0 = 1.71 a^{3/2} \left\{ \left[-0.1 a^{3/2} + (0.01 a^3 - 1/2 d_*^3)^{1/2} \right]^{1/3} + \left[-0.1 a^{3/2} - (0.01 a^3 - 1/2 d_*^3)^{1/2} \right]^{1/3} \right\}^{-3} \end{aligned}$$

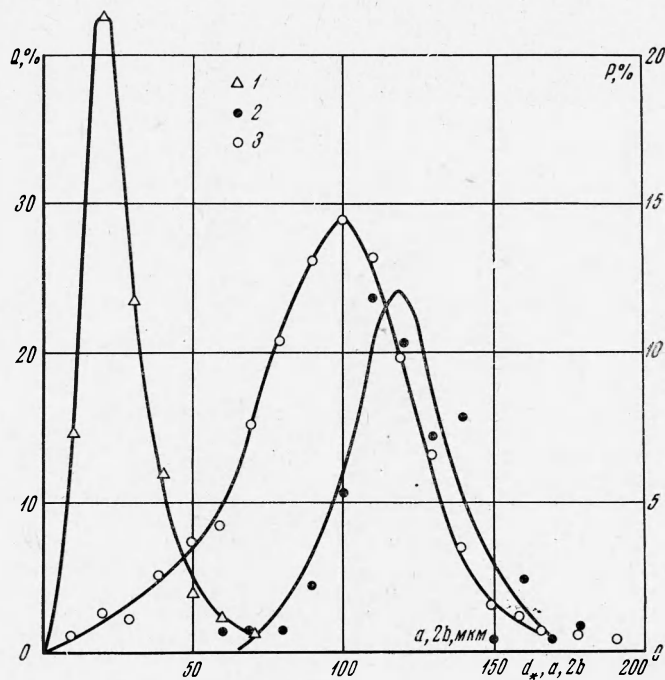
Таким образом, имеются две случайные функции d_0 и v_0 , вид которых известен. Если аргументы d_* и a принимают ряд дискретных значений

$$d_{*1}, d_{*2}, \dots, d_{*q} \quad (1 \leq i \leq q), \quad a_1, a_2, \dots, a_p \quad (1 \leq j \leq p)$$

то распределение вероятностей каждой из функций d_0 и v_0 определяется суммой

$$\sum_{k=1}^N P(d_{*i})_k Q(a_j)_k \quad (ij=k, pq=N)$$

При этом, если одному значению d_0 (или v_0) соответствовало несколько вероятностей PQ , выбиралась такая пара d_0 и v_0 , совместное появление которой отвечало наибольшему значению PQ .



Фиг. 1

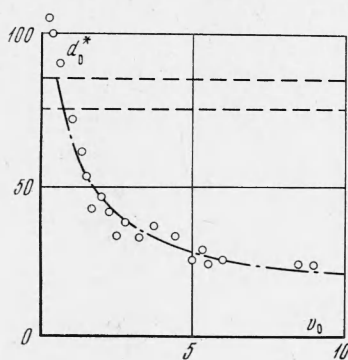
Экспериментальная вероятностная кривая распределения $P(d_*)$ для тонких алюминиевых фольг $l = 10$ мкм и диапазона изменения скоростей, зарегистрированных на ФЭУ (1 ÷ 10) км/сек, приведена на фиг. 1 (кривая 3). Как показано в работе [1], она почти точно совпадает с нормальным распределением. Максимальная скорость, зарегистрированная в опытах с алюминиевой пластиной, равнялась 8.6 км/сек. Общее количество кратеров составляло 234. На фиг. 1 даны также кривая 1 распределения $Q(a)$ по глубинам a и кривая 2 распределения $Q(2b)$ по диаметрам $2b$. Из нее видно, что основное количество кратеров имеет значение глубин в пределах от 10 до 20 мкм, диаметров — от 110 до 120 мкм.

Значения a были разбиты на диапазоны по 10 мкм в пределах до 70 мкм, значения d_* для тонких фольг — на те же диапазоны в пределах до 160 мкм. Таким образом, значения q и p равнялись 7 и 16 соответственно. Общее число произведений $P(d_{*i}) Q(a_j)$ составляло $N = 112$. Для каждого из них на ЭВМ «Минск-14» находилось решение системы (2.2) относительно d_0^* и v_0 (d_0^* — истинный размер частицы в момент соударения, отличный от первоначального d_0). На график (фиг. 2) нанесены результаты расчетов для соответствующих пар d_0^* , v_0 , появление которых отвечает одинаковой максимальной вероятности (пунктиром обозначены границы первоначального размера d_0). Сравнение с данными работы [1] для алюминиевой пластины (штрих-пунктир) показывает удовлетворительное совпадение. График (фиг. 2) ограничен справа максимальной полученной скоростью 8.6 км/сек. Распределение точек на зависимости соответствует уменьшению вероятности их появления с ростом v_0 .

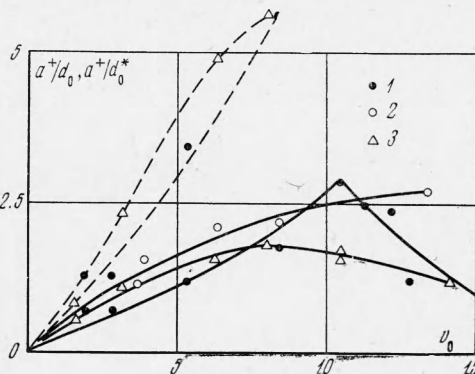
Результаты подтверждают выводы работы [1] о том, что скорость разгона, отвечающая началу обгорания стеклянных частиц в условиях проведения опыта, $\sim (0.6 \div 1.0)$ км/сек и что большинство частиц должно «слипаться» и обладать скоростями $v_0 < 0.5$ км/сек (расчетные значения d_0^* получаются выше первоначального d_0).

Перейдем к обсуждению экспериментальных результатов.

3. На фиг. 3 приведены данные по внедрению стеклянных сфер в полимерные пакеты, отнесенные к их первоначальному размеру d_0 (сплошные линии), причем под a^+ подразумевается общая толщина пробиваемых листов пакета, соответствующая частице со скоростью, зарегистрированной ФЭУ. Точки 1 фиксируют соударение стекла ($d_0 = 95 \pm 5$ мкм) с полиэтиленовым пакетом, точки 2 — стекла ($d_0 = 175 \pm 225$ мкм) с полиэтиленовым пакетом, точки 3 — стекла ($d_0 = 95 \pm 5$ мкм) с пакетом из листов полиэтилентерефталата. Пунктиром отмечена зависимость a^+ / d_0^* от v_0 для $d_0 = 95 \pm 5$ мкм с использованием расчетных результатов (фиг. 2) до $v_0 \sim 9$ км/сек (возможная экстраполяция результатов (фиг. 2) показывает, что ход зависимостей a^+ / d_0^* качественно подобен ходу зависимостей a^+ / d_0).



Фиг. 2



Фиг. 3

Кратер, образованный в пакете самой быстрой частицей—лидером, определялся сравнением размеров уцелевшей частицы с расчетным (фиг. 2), а также косвенным путем — по максимальному входному диаметру отверстия в первом листе пакета. Так как толщина листов в пакете $l \sim d_0$, диаметр отверстий в них d_* должен уже заметно зависеть от v_0 даже с учетом запыливания. Кроме того, при достаточно высоких v_0 по краям отверстия можно было наблюдать характерное потемнение материала (полиэтилена) или обугливание (полиэтилентерефталата).

Экспериментальные результаты удара стеклянных сфер $d_0 = 95$ мкм по полиэтилену ($l = 60$ мкм) показали, что до $v_0 = 10-11$ км/сек a^+ растет, но затем падает, хотя входное отверстие в первом слое увеличивается. При $v_0 \sim 20$ км/сек наблюдался пробой только первого слоя, а на втором листе налет однородного материала с диаметром нарушения полиэтиленового слоя ~ 600 мкм.

Можно предположить, что уменьшение a^+ для самых быстрых частиц соответствует скорости v' , при которой стеклянная частица данного размера (возможно, уже претерпевшая дробление и обгорание) полностью переходит в вязко-текучее состояние от давлений и температур, возникающих в месте соударения с полимерным материалом, и поэтому обладает все меньшей пробивной способностью.

При $v_0 = 21$ км/сек стеклянная сфера $d_0 = 95 \pm 5$ мкм, по-видимому, полностью плавится уже после пробы первого слоя $l = 60$ мкм. Критическая скорость для сфер этого размера $10 \div 11$ км/сек. Для большего размера $d_0 = 175 \div 225$ мкм она выше, хотя процессы плавления в материале частицы начинаются всегда при постоянной пороговой скорости для данной пары ударник — преграда, определить которую можно было бы при известных уравнениях состояния стекла и полиэтилена. При соударении сфер $d_0 = 95 \pm 5$ мкм с полиэтилентерефталатом ($l = 25$ мкм) критическая скорость ~ 8 км/сек.

До критических скоростей удара v' влияние расстояния между листами пакета на величину a^+ обычно отсутствует, что характерно для пробивания нескольких преград нераздробленной частицей. При $v_0 > v'$ a^+ будут уменьшаться, хотя в опыте могут наблюдаться максимальные значения a^+ , соответствующие частицам с $v_0 = v'$. При пробивании полиэтиленовых пакетов в некоторых случаях наблюдалось уменьшение размера отверстия d_* с возрастанием номера слоя вплоть до полного их исчезновения, хотя частицы обнаруживались еще через 3 \div 4 слоя. Это подтверждает ранее обнаруженный эффект увеличения запыливания с уменьшением скорости соударения v_0 [2,3].

Поступила 26 X 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов Ю. С. Об одном возможном методе оценки скорости и размеров метеорных частиц. Космические исследования, 1970, т. 8, вып. 5, стр. 758.
2. Степанов Ю. С. Исследование некоторых физико-механических характеристик при пробивании одиночной преграды. ПМТФ, 1966, № 3, стр. 111.
3. Андрианкин Э. И., Степанов Ю. С. Глубина пробивания при ударе метеорных частиц с допороговыми скоростями. Космические исследования, 1968, т. 6, вып. 5, стр. 752.
4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., «Наука», 1969.
5. Halperson S. M. Some phenomena associated with impacts into Aluminum. Proc. 6-th Sympos. Hyperveloc. Impact, Cleveland, Ohio, 1963, vol. 2, pt 2, p. 4557.

О ПОЛЗУЧЕСТИ УПРОЧНЯЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ С РАЗНЫМИ СВОЙСТВАМИ НА РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ

А. Ф. Никитенко, О. В. Соснин, Н. Г. Торшенин, И. К. Шокало

(Новосибирск)

В работе [1] утверждается, что легкие сплавы, как правило, обладают различными свойствами ползучести при растяжении и сжатии. Там же сделана попытка описать процессы ползучести таких материалов для простейшего случая степенной зависимости скорости установившейся ползучести от напряжения при неизменном показателе степени. В работе [2] показана возможность описания ползучести неупрочняющихся материалов более общей анизотропии, при этом используются различные зависимости для подпространства напряжений, где линейный инвариант тензора напряжений $\sigma_{ii} > 0$ и, соответственно, $\sigma_{ii} < 0$. В каждую из зависимостей входят характеристики материала, найденные только из экспериментов на растяжение и, соответственно, только из экспериментов на сжатие. В данной работе на примере ползучести при комнатной температуре одного из титановых сплавов экспериментально показано, что аналогичный метод раздельного описания в зависимости от знака первого инварианта тензора напряжений применим и к упрочняющимся материалам с разными свойствами на растяжение и сжатие.

1. В качестве исходного материала был взят лист титанового сплава — толщиной 20 мм. Направление наибольшего размера листа принято в дальнейшем называть продольным направлением, а перпендикулярное ему в плоскости листа — поперечным направлением. Заготовки для испытуемых образцов вырезались в продольном, в поперечном и в направлении, составляющем угол 45° с первыми (диагональное направление). В зависимости от вида и программы эксперимента из указанных заготовок изготавливались образцы различной формы, при этом предварительно было проведено исследование о влиянии режима механической обработки образцов и их последующей доводки с целью выбора и назначения строго определенного режима. После изготовления образцы термообработке не подвергались.

Для снятия диаграмм $\sigma - \epsilon_0$ изготавливались плоские образцы размером $5 \times 10 \text{ мм}^2$ и длиной рабочей части 100 мм. Для снятия аналогичных диаграмм на сжатие изготавливались цилиндрические образцы диаметром 12 мм и длиной рабочей части 40 мм. На фиг. 1 представлены диаграммы $\sigma - \epsilon_0$. Здесь и в дальнейшем за σ_{ij} берется безразмерная величина отношения текущего напряжения к $\sigma_{0,2}$ при растяжении. На диаграмме светлыми точками отмечены экспериментальные данные на растяжение образцов продольного направления, крестиками и треугольниками для поперечного и для диагонального направлений соответственно. Черными точками отмечены данные по сжатию образцов, вырезанных в продольном направлении. Из представленных диаграмм следует, что материал в смысле мгновенных упруго-пластических свойств практически изотропен и обладает одинаковыми свойствами на растяжение и сжатие.

Картина совершенно меняется в отношении процесса ползучести. Эксперименты на ползучесть при растяжении проводились на образцах прямоугольного сечения $10 \times 20 \text{ мм}^2$ и длиной рабочей части 160 мм. В процессе эксперимента измерялись осевое удлинение образца и изменение размеров по ширине и толщине в средней части рабочей