

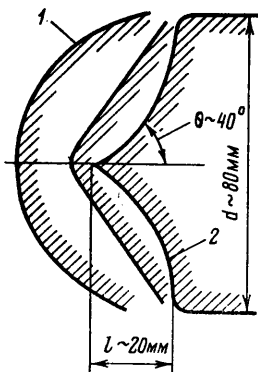
О ФОРМЕ ТЕЛА, РАЗРУШАЕМОГО СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ ГАЗА

В. Н. КАЛАШНИК, В. Е. КИЛЛИХ, Г. И. ПЕТРОВ,
Ю. В. ПОЛЕЖАЕВ, А. Н. СМИРНОВ, Ю. В. ЧУДЕЦКИЙ

(Москва)

Движение высокоскоростных объектов в плотной среде приводит к интенсивному нагреву их лобовых поверхностей. При этом может начаться «сильное взаимодействие» набегающего потока и поверхности тела, при котором тело не просто воспринимает тепловое и силовое воздействие потока, но за счет интенсивного вдува продуктов разрушения и изменения геометрической формы лобовой поверхности существенно перестраивает само поле течения. Экспериментальное и расчетное исследование различных диапазонов существования сильного взаимодействия привели к установлению закономерности возникновения устойчивых форм тел, разрушаемых гиперзвуковым потоком газа.

Ранее при изучении остатков метеоритных тел была обнаружена и подробно описана особая геометрическая форма поверхности, которая носит следы теплового разрушения. Эта форма, близкая к конической с углом полураствора около 50° , получила в литературе название метеоритной. Расчетами было показано, что образование метеоритной формы можно объяснить наличием полностью турбулентного пограничного слоя на поверхности обтекаемого тела [1, 2], однако экспериментальное подтверждение этого факта оказалось достаточно сложным.



Фиг. 1

Последнее связано с ограниченным диапазоном чисел Рейнольдса высокотемпературных аэродинамических установок, на которых обычно исследуются процессы разрушения различных материалов [2, 3]. Поэтому при числах Рейнольдса $Re_w < 10^5$ более типичной является форма «ламинарного затупления», подобная эллиптической с соотношением полуосей порядка 0.4 [2].

В последние годы средства экспериментальных исследований получили значительное развитие, в частности стало возможно проведение испытаний в диапазоне высоких чисел Маха и Рейнольдса. В данной работе приводятся некоторые результаты исследования газодинамики и теплообмена разрушающихся моделей, поверхность которых приобрела сложную форму в зависимости от числа

Рейнольдса и Маха набегающего потока. Температура торможения набегающего потока достигала 3300°K , числа M от 1 до 3,5, числа Re_w , рассчитанные по диаметру модели, составляли $10^6 - 10^7$.

В качестве материала для моделей выбран полиметилметакрилат (оргстекло), отличающийся однородностью (что обеспечило хорошую повторяемость результатов), отсутствием пленки расплава на разрушающейся

поверхности, равномерной шероховатостью зубчатого типа, имеющей некоторое сходство с регмаглиптами на поверхности метеоритов. Скорость разрушения этого материала в потоке достаточно велика, что позволяет пренебречь временем установления квазистационарного процесса уноса массы [3].

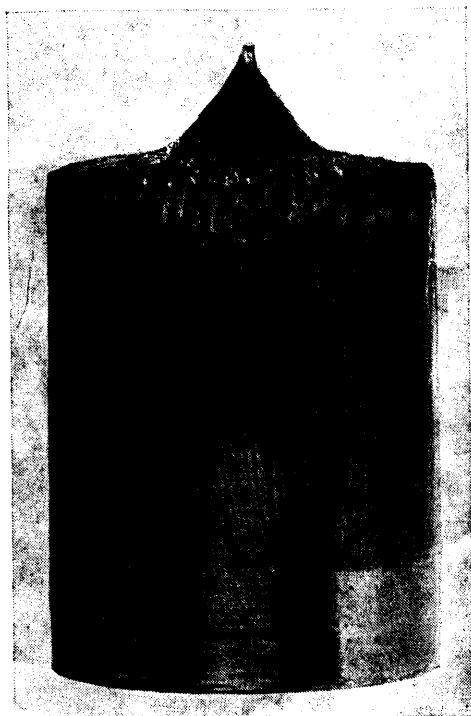
На фиг. 1 представлена динамика изменения контура модели, полученная по фотографиям процесса разрушения (1 — исходная форма, 2 — установившаяся форма). Интересно отметить последовательный переход от полусферической начальной формы к заостренной и далее к установившейся форме в виде конического выступа на почти плоском (квазиплоском) торце. Фотография модели после испытания показана на фиг. 2.

Проведенные авторами расчетно-экспериментальные исследования позволяют объяснить закономерности образования той или иной формы разрушающейся поверхности и указать параметры, определяющие области их существования. Если появление метеоритной формы можно связать с ростом числа Рейнольдса в набегающем потоке, то форма с коническим выступом возможна лишь в диапазоне высоких чисел Маха и Рейнольдса одновременно. Поэтому экспериментально получить эту форму значительно сложнее.

Нижний порог чисел Рейнольдса, при которых возможен переход от формы ламинарного затупления к метеоритной форме разрушающейся поверхности, зависит от многих факторов,

среди которых первостепенное значение имеет вид и размер шероховатости поверхности. Зубчатая шероховатость полиметилметакрилата (в виде лунок с острыми краями), как показали испытания, весьма существенно снижает критическое число Рейнольдса перехода от ламинарного режима течения в пограничном слое к турбулентному по сравнению с гладкой поверхностью. В результате точка перехода оказывается в дозвуковой области течения за ударной волной. Это обстоятельство существенно влияет на распределение теплового потока на поверхности модели.

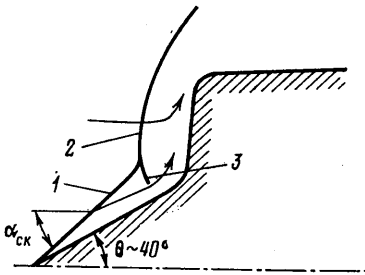
Если теплообмен в критической точке пропорционален корню квадратному из числа Рейнольдса, а максимальное значение теплового потока при турбулентном пограничном слое находится в звуковой точке и пропорционально $(Re_w)^{0,8}$, то понятно, почему с ростом числа Рейнольдса скорость уноса массы в звуковой точке сначала сравнивается, а потом и значительно превышает скорость разрушения в точке торможения. Появление впадины на профиле тела перестраивает газодинамическую карту обтекания. Вместо одной ударной волны появляется система скачков (фиг. 3). Один (1) возникает от центральной выступающей части тела, второй (2) — от пери-



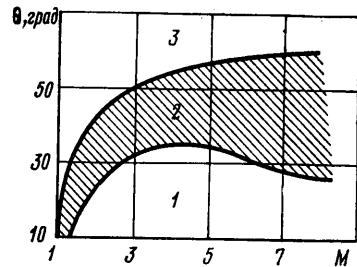
Фиг. 2

ферической части поверхности торца и, наконец, третий (3) — в зоне пересечения первых двух.

Последующее развитие формы разрушающейся поверхности протекает по-разному в потоках с малыми и большими числами Маха. Известно [4], что система из косою и прямого скачков более эффективно восстанавливает полное давление потока, чем один прямой. Поэтому при определенных условиях интенсивность теплообмена в основании центрального выступа (фиг. 3) может оказаться не меньше, чем в точке торможения. Другими словами, впадина на профиле тела, образовавшаяся из-за отличия



Фиг. 3



Фиг. 4

теплообмена в ламинарной и турбулентной зонах пограничного слоя, может существенно увеличиться за счет перестройки газодинамической картины обтекания.

В работах Г. И. Петрова и Е. П. Ухова по сверхзвуковым диффузорам (см. [4]) было доказано: полное давление за системой скачков превышает полное давление за прямым скачком при $M \geq 2$ тем сильнее, чем ближе угол наклона косою скачка к некоторому оптимальному значению (например, 43° при $M=3$). Это условие можно считать необходимым, но не достаточным в проблеме установления формы разрушающейся поверхности с центральным коническим выступом. Дополнительно требуется, чтобы при падении скачка от торца модели на конический выступ обтекание последнего осталось безотрывным. В противном случае максимум теплового воздействия передвинется вниз по потоку к точке присоединения пограничного слоя.

Эксперименты, поставленные В. С. Авдуревским и др. [5], показали, что при наличии турбулентного пограничного слоя на коническом выступе, полуугол которого находится в заштрихованной области 2 на фиг. 4, обтекание будет безотрывным и стационарным. Это связано с тем, что отношение давлений за падающим скачком и перед ним в этом случае меньше критического значения перепада давления, необходимого для отрыва пограничного слоя. При всех полууглах в области 1 на фиг. 4 течение происходит с отрывом пограничного слоя и может иметь пульсационный характер. При больших углах конуса (область 3) обтекание его происходит с отошедшей ударной волной.

Таким образом, совпадение экспериментально наблюдаемой формы разрушающейся поверхности (фиг. 1 и 2) с оптимальным диапазоном полууглов конуса, установленным по газодинамическим и тепловым исследованиям, позволяет не только объяснить природу этого нового физического явления, но и указать основные закономерности его развития при других сочетаниях определяющих параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мурзинов И. Н. О форме тел, разрушающихся под действием интенсивного нагревания при движении в атмосфере. Изв. АН СССР. Механика, 1965, № 4.
 2. Чудецкий Ю. В., Широков Н. Н., Экономов А. П. Экспериментальное исследование взаимодействия высокотемпературного потока с материалами. В сб.: Аэродинамика и газовая динамика. М., «Наука», 1976.
 3. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. М., «Энергия», 1976.
 4. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М., «Наука», 1969.
 5. Авдучевский В. С., Грецов В. К., Медведев К. И. Устойчивость течений с передними срывными зонами. Изв. АН СССР. МЖГ, 1972, № 1.
-