

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 536.46

**Устойчивость к разрушению образцов материалов
в сверхзвуковом высокотемпературном потоке***

В.А. Забайкин¹, А.Н. Прохоров², П.К. Третьяков¹

¹*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

²*Центральный институт авиационного моторостроения
им. П.И. Баранова, Москва*

E-mail: VAZ@itam.nsc.ru

Экспериментально исследовалась устойчивость к разрушению металлических и неметаллических образцов материалов при обтекании сверхзвуковым высокотемпературным потоком. Установлено определяющее влияние газодинамической структуры на область прогрева и воспламенения металлов. При достижении критической температуры происходит горение либо эрозия образца, что определяет скорость его разрушения.

Ключевые слова: сверхзвуковой высокотемпературный поток, плазмотрон, термостойкие материалы, горение.

Для создания нового поколения высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) и двигательных установок требуется разработка термостойких (под термостойкостью в данном случае понимается способность материалов противостоять, не разрушаясь, термическим напряжениям, обусловленным изменением температуры) материалов, устойчивых к разрушению в условиях окислительной среды при длительном воздействии высоких температур и скоростного напора [1–3]. Наиболее теплонапряженными местами являются носовые обтекатели, кромки воздухозаборников и стенки камер сгорания. Для них рассматриваются различные металлические и неметаллические материалы, в частности, жаропрочные сплавы (типа Inconel, титано-молибденовые и др.), керамические материалы и углеродные композиты. Расчетно-теоретические исследования поведения материалов чрезвычайно сложны из-за необходимости учета взаимного влияния физических и химических свойств разнородных (особенно для композиционных) материалов, а также широкого диапазона параметров течения. Экспериментальное моделирование определяется уровнем давлений и температур, достигаемых в наземных установках, и временем испытаний. Наличие высокоэнтальпийных стенов дает возможность получать параметры потока, приближенные к натурным условиям полета ЛА.

* Работа выполнена по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН № 26 «Горение и взрыв» (проект № 9 «Исследование свойств термостойких материалов в высокотемпературном сверхзвуковом потоке с горением»).

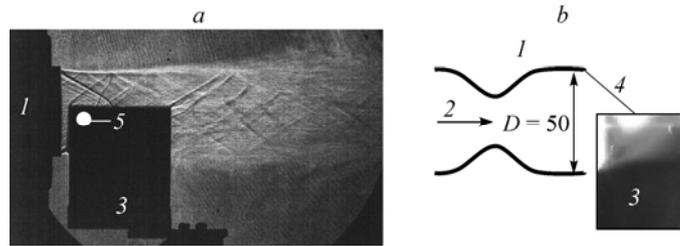
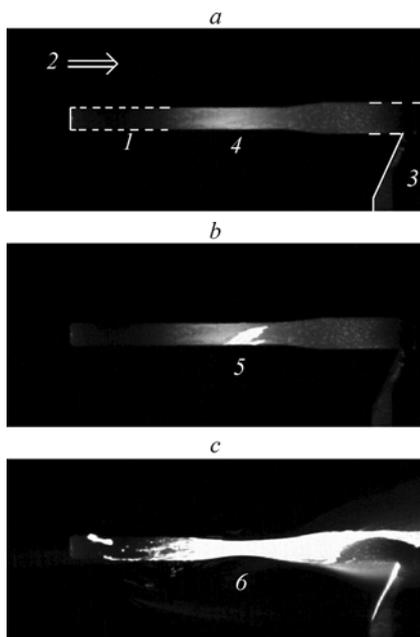


Рис. 1. Теневая картина обтекания образца в виде пластины (а) и схема эксперимента с фотографией нагретого образца во время пуска (б).

1 — сопло, 2 — горячий воздух, 3 — образец, 4 — скачок уплотнения, 5 — область измерения пирометром.

В работе приведены результаты экспериментов по определению устойчивости к аэротермодинамическому воздействию отдельных образцов материалов на стенде сверхзвукового горения с электродуговым подогревом воздуха (плазматроном) [4]. Изучалось поведение образцов при достижении критических температур, достаточных для разрушения материала. Испытания проводились в условиях внешнего обдува при числе Маха $M = 2,2$ и температурах торможения до $T_0 = 2500$ К. Образцы крепились вблизи выходного среза осесимметричного сопла диаметром 50 мм. На рис. 1 представлены схема установки образца и теневая картина обтекания. Температура поверхности образца определялась пирометром IS 300. Из рисунка видно, что на локальный прогрев образца значительное влияние оказывает волновая структура потока. Эксперименты показали, что в процессе высокотемпературных пусков разогрев, разрушение или начало горения материалов происходит как с передней кромки, так и в местах падения на образцы скачков уплотнения воздушного потока. В таких зонах на стальных (нетермостойких) образцах начинается плавление, отрыв капель в поток, их дробление и воспламенение. Скоростная видеорегистрация поверхности показала, что скорость уноса материала с торца достигает 10 мм в секунду. На рис. 2 представлена последовательность процессов разогрева (а), воспламенения (б) и горения (с) стального стержня, зарегистрированных скоростной камерой технического зрения с применением нейтральных светофильтров. Воспламенение произошло в зоне падения скачка уплотнения на стержень,



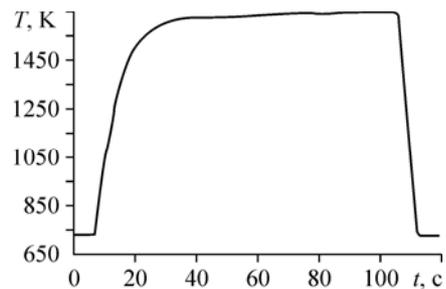
где начался разогрев, заметный по свечению (4). В дальнейшем началось плавление металла (5) и воспламенение с последующим интенсивным выгоранием в этой зоне (б). Видно, что расплавленный металл может течь по направлению воздушного потока и против него (с). Это вызвано возникновением отрывной зоны на начальном участке стержня.

Проведенные испытания различных марок сталей, керамических и композиционных материалов показали, что температура поверхности принимает постоянное значение за время $t \approx 30$ с

Рис. 2. Фотография горения стального (Ст3) стержня диаметром 6 мм в воздушном потоке.

а — разогрев, б — плавление и воспламенение, с — горение; 1 — образец (несветящаяся часть обозначена пунктиром), 2 — горячий воздушный поток ($T_0 = 1700$ К), 3 — державка, 4 — свечение зоны разогрева в области падения скачка уплотнения, 5 — расплавленный металл, 6 — образование перетяжки в зоне горения.

Рис. 3. Зависимость температуры поверхности образца ВЖ98 от времени.



(± 5 с в условиях представленных экспериментов для пластин $50 \times 50 \times 5$ мм и $15 \times 50 \times 5$ мм из разных материалов с закругленной и тупой передней кромкой). На рис. 3 показана динамика прогрева образца из стали ВЖ98 при температуре торможения воздушного потока 1700 К. Общее время эксперимента составило 100 с, при этом поверхность в измеряемой пирометром области прогрелась до температуры $T = 1650$ К. Образец выдержал испытание без деформации и изменения геометрических размеров (рис. 4а). Образец из стали 30ХГСА воспламенился на 16-й секунде эксперимента при температуре в измеряемой области $T \sim 1300$ К. Плазмотрон был выключен на 18-й секунде. За две секунды образец выгорел до состояния, показанного на рис. 4б. На рис. 4с приведено состояние после испытания керамического образца на основе кварцевых волокон. Образцы из этого материала деформировались или расплавились потоком при достижении температуры $T \sim 1520$ К. Без заметного нарушения формы образцы выдерживали нахождение в горячем потоке не более 15–20 с.

Наиболее стойким материалом, не подверженным быстрому разрушению при достижении предельных температур, оказался фехраль. Образец подвергся воздействию потока с температурой $T_0 = 2500$ К, что заведомо превышало его термостойкость (температура плавления составляла около 1800 К). В течение 27 секунд происходил интенсивный нагрев образца, затем началось его разрушение (эрозия). Однако интенсивного горения, характерного, например, для стали или титана, не произошло. Наблюдались отдельные искры и постепенное оплавление передней кромки с натеканием металла на боковую поверхность. Общее время воздействия составило 34 с. Вид образца после испытания представлен на рис. 4д.

Хорошую устойчивость к интенсивному аэротермодинамическому воздействию показали образцы из углерод-карбид-кремниевый композиционный материал (УКККМ). Несколько испытаний длительностью до 100 с и максимальными температурами $T_0 = 2000$ К а также испытания длительностью 12–15 с при температурах 2200–2450 К не привели к видимой деформации образцов.

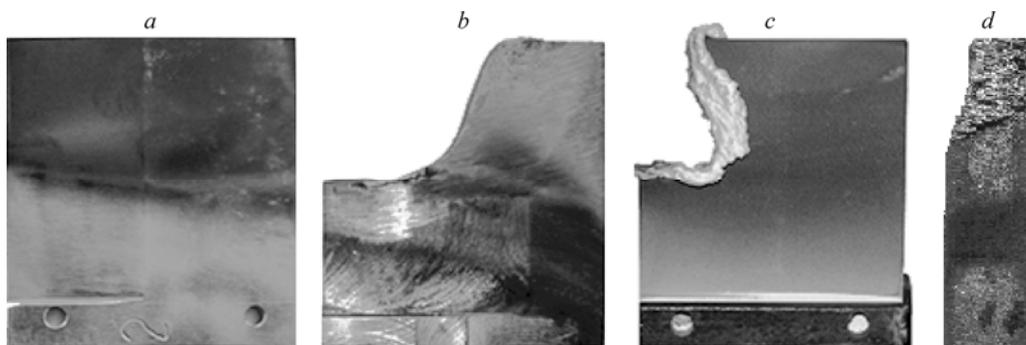


Рис. 4. Вид образцов после испытания.

a — сталь ВЖ98, *b* — сталь 30ХГСА, *c* — керамика на основе кварцевых волокон, *d* — фехраль (ПХ25Ю6); температура воздушного потока $T_0 = 1650$ –1700 (*a*–*c*), 2500 (*d*) К.

Выводы

Эксперименты показали, что в сверхзвуковых потоках волновая структура оказывает заметное воздействие на протекание процесса разогрева, разрушения и воспламенения материалов. Получены данные о свойствах ряда образцов материалов при воздействии сверхзвуковым высокотемпературным потоком. Установлено, что сплавы ВЖ98 и фехраль (ПХ25Ю6) не меняют свою форму в сверхзвуковом потоке при температурах до 1700 К, а композиционный материал УКККМ — до 2000 К, при времени воздействия до 100 с. С достижением материалами критических температур происходит их механическое разрушение (характерно для неметаллов), либо горение или эрозия (для металлов).

Список литературы

1. **Гоффин М.Я.** Жаростойкие и теплозащитные конструкции многоразовых аэрокосмических аппаратов. М.: ТФ МИР, 2003. 671 с.
2. **Dinescu I., Oprescu M.** Technologies for future precision strike missile system // The Annals of «Dunarea de Jos» University of Galati. Fascicle IX Metallurgy and Materials Sci. 2003. Vol. 2. P. 24–27.
3. **Каблов Е.Н.** Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года. ВИАМ/2012-206065.
4. **Забайкин В.А.** Качество высокоэнтальпийного потока при электродуговом подогреве воздуха в установке для исследования сверхзвукового горения // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 1. С. 28–36.

Статья поступила в редакцию 18 сентября 2014 г.