

## ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АЛЮМИНИЕВОГО БЛОКА С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ПРОДУКТАМИ СГОРАНИЯ ПОРОХОВ

*Ю. В. Фролов, Ю. А. Гостинцев, Г. Н. Марченко, В. П. Смирнов,  
И. Г. Хакимов, Ю. В. Михайловский, В. П. Гасилин, М. Я. Кордон*

*(Москва)*

При работе различных аппаратов в агрессивных средах нередко возникают условия, когда металлические конструкции или их элементы оказываются в режиме высокотемпературного нагрева. При этом отдельные детали нагреваются до температуры плавления, что может привести к их деформации и разрушению. Такие металлы, как железо или алюминий, могут в сильно нагретом состоянии активно вступать в реакцию окисления, воспламеняться и переходить в режим самоподдерживающегося горения [1].

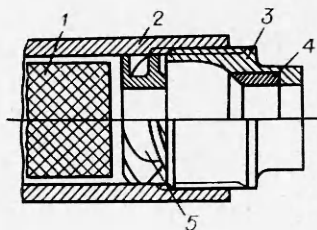
Для практики важны исследования взаимодействия высокоскоростного высокотемпературного газового потока с конструкциями (сопловые блоки, газопроводы или лопасти газовых турбин). Здесь существенно выявление критических режимов работы материалов. В [2] поставлена задача об окислении и воспламенении металлических пластин и блоков металла, нагретых в окислительной газофазной среде до критической начальной температуры. Решение уравнений теплопроводности в металле и газе с учетом кинетического закона окисления металла показало, что в реальных условиях вероятность воспламенения нетеплоизолированных блоков мала. Так, критическая температура поверхности блока алюминия в момент воспламенения должна быть равна температуре плавления его окисного слоя ( $\sim 2300$  К), т. е. намного превышать температуру плавления самого металла.

Расчет критических условий воспламенения металлических пластин с переменной толщиной окисного слоя и при параболическом законе окисления показал принципиальную возможность перехода окисления поверхности металла в режим воспламенения [3]. Однако справедливость проведенных расчетов не была подтверждена экспериментально. Характер взаимодействия дисков-вставок, по существу, являющихся соплом (сопло-очко), при истечении через имеющееся в них центральное отверстие ( $d=0,3\div 0,4$  мм) продуктов сгорания пороха на основе нитроцеллюлозы (13,37%  $N_2$ ) исследован в [4]. Установлено, что механизм разгара центральных отверстий дисков-вставок может быть либо инертно-эрозионным (термическая инертная эрозия), либо активно-эрозионным, когда на эрозионный эффект накладывается химическая реакция материала диска с кислородсодержащими компонентами газового потока.

Для выяснения особенностей окисления и определения критических условий воспламенения и горения нетеплоизолированного блока колец из алюминиевого сплава в высокотемпературном газовом потоке высокой плотности (при относительно низких давлениях  $\sim 200\div 400$  атм) проведены исследования в установке, основу которой составил модельный ракетный микродвигатель с сопловым блоком камеры сгорания из алюминиевого сплава. В критическом сечении двигателя для предотвращения изменения его диаметра устанавливались специальные стальные кольца-вставки.

В другом варианте сопловой блок выполнялся из стали; в конфузорной его части устанавливалось тонкостенное кольцо из алюминиевого сплава (диаметр 23,0 мм, толщина  $1,3\div 1,5$  мм, ширина  $6,0\div$

Рис. 1. Схема соплового блока.  
1 — заряд; 2 — камера; 3 — сопло;  
4 — стальное кольцо; 5 — завихри-  
тель.



$\div 7,0$  мм); конструкция соплового блока предусматривала возможность полной тепловой изоляции кольца от внутренней поверхности соплового блока при полном сохранении профиля последнего. Средняя массовая скорость  $\rho w$  продуктов сгорания пироксилинового пороха (12,5%  $\text{CO}_2$ , 42,0%  $\text{CO}$ , 22,0%  $\text{H}_2\text{O}$ , 11,0%  $\text{N}_2$ , 12,5%  $\text{H}_2$ ) за время работы микродвигателя (20 мс) при среднем статическом давлении  $p \approx 200$  атм, замеренном на входе в сопловой блок, составила  $1,2 \cdot 10^4$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

После эксперимента внутренняя поверхность соплового блока подвергалась анализу. Измерялась также масса блока. Для интенсификации процессов теплообмена [5—8] в сопловом блоке устанавливался завихритель (рис. 1). С целью сохранения расходных характеристик сопла завихритель имел центральное отверстие с диаметром, равным диаметру критического сечения сопла. Анализ показал, что видимых изменений на внутренней поверхности соплового блока из алюминиевого сплава при осевом истечении продуктов сгорания не происходит, а тяговые характеристики двигателя не меняются.

Результат взаимодействия такого же соплового блока с частично закрученным потоком показан на рис. 2. Здесь приведены фотографии разреза сопловых блоков до и после истечения продуктов сгорания при различной степени интенсивности закрутки  $\alpha_*$  [5]. Организация вращательно-поступательного движения в сопловом блоке приводит к уносу массы алюминия, пропорциональному величине интенсивности закрутки потока. При  $\alpha_* = 0,069$  на внутренней поверхности сопла видны слабо выраженные спиральные следы, положение которых совпадает с направлением движения струи продуктов сгорания. Внутренняя поверхность соплового блока покрыта тонким темным налетом, по-видимому, углеродом и карбидом алюминия, образовавшимся в результате взаимодействия алюминия с углеродом (см. рис. 2, в).

По мере увеличения  $\alpha_*$  меняется не только величина поверхности, подверженной воздействию потока, но и характер этого воздействия (см. рис. 2, в, д). Если при  $\alpha_* \approx 0,069$  следы «ручьи» имеют четкие границы и гладкую поверхность, то при  $\alpha_* = 0,138$  уменьшается даже общая длина соплового блока; вся его внутренняя поверхность приобретает шероховатый «пенноподобный» рельеф, а на стальной вставке в критическом сечении можно наблюдать отдельные частицы и их агломераты из алюминия и его окисла (см. рис. 2, д).

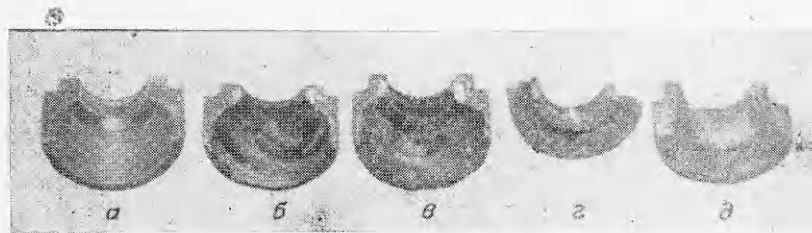


Рис. 2. Разрез сопловых блоков из алюминиевого сплава до истечения (а) и после истечения продуктов сгорания (б — д) при  $\alpha_* = 0,069; 0,80; 0,100; 0,138$ .

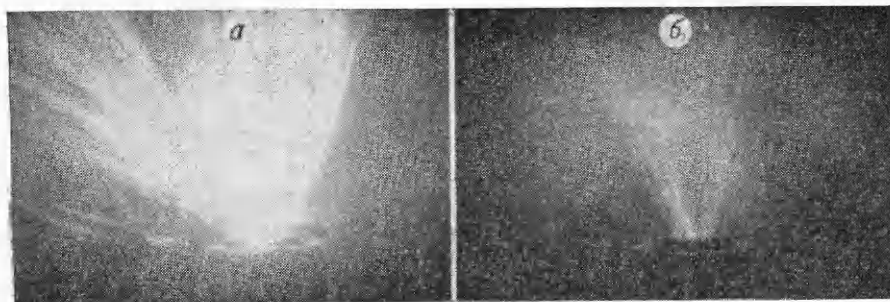


Рис. 3. Истечение продуктов сгорания.

При закрутке меняется и вид истекающей струи. В ней отчетливо фиксируются следы-треки светящихся частиц. Количество последних возрастает по мере увеличения интенсивности закрутки и отношения длины полости соплового блока к диаметру. На рис. 3 представлены фотографии истечения осевого потока продуктов сгорания (а), частично-закрученного потока при  $\alpha_* = 0,069$  и отношении длины полости соплового блока (вихревой камеры) к диаметру  $L/D = 0,5$  (б) и  $L/D = 3,0$  (в).

Увеличение длины вихревой камеры при наличии осевого потока, вдуваемого через центральное отверстие завихрителя, приводит к ослаблению и размытию вращающегося потока по мере его продвижения, о чем свидетельствуют следы-«ручьи» на внутренней поверхности сопловых блоков. Унос массы соплового блока из алюминиевого сплава при  $\alpha_* = 0,069; 0,100$  и  $0,138$  составляет соответственно  $0,84; 1,42$  и  $1,88$  г. Это создает, согласно измерениям, прирост импульса от  $7,0$  до  $10,0\%$ . Использование в качестве заряда микродвигателя модельного состава с  $5,0\%$  мелкодисперсного алюминия приводит к еще более резкому изменению массы соплового блока (см. рис. 2, г) — до  $2,18 \div 2,20$  г и приросту импульса на  $15,0\%$ .

На рис. 4 показаны кольца из красной меди (а), органического стекла (б) и из алюминиевого сплава (в), устанавливаемые в сопловом блоке из стали до и после сжигания пироксилинового пороха ( $\alpha_* = 0,080$ ). Наиболее сильные изменения, вплоть до разрушения на отдельные сектора, претерпели кольца из алюминиевого сплава. Тепловая изоляция кольца от соплового блока усугубляет этот эффект. Однако характерные признаки воспламенения и парофазного горения не наблюдались.

Эрозия металлов в нагретых газовых потоках, сопровождаемая уносом массы, в том числе и в условиях сопловых блоков, общеизвестна. Поведение металлов в таком потоке можно условно подразделить на два этапа: 1) нагрев до температуры плавления и 2) плавление всего объема или поверхностного слоя исследуемого вещества.

Поверхностный слой, особенно в жидком состоянии, под действием аэродинамической силы сопротивления при обтекании тела скоростным потоком газа может уноситься в газовую фазу — наступает эрозия материала. Если газовый поток абсолютно инертен по отношению к веществу, то протекает чисто термическая эрозия с характерными для нее законами. В [9, 10] показано, что эрозионное сопротивление материалов может быть оценено в первом приближении параметром  $(c\rho\lambda)^{1/2} \times (T_{пл} - T_0)$ , где  $c, \rho, \lambda, T_{пл}, T_0$  — соответственно теплоемкость, плотность, теплопроводность, температура плавления и начальная температура вещества обтекаемого тела. Иными словами, при одних и тех же значениях тепловых потоков и сохранении условий теплообмена с

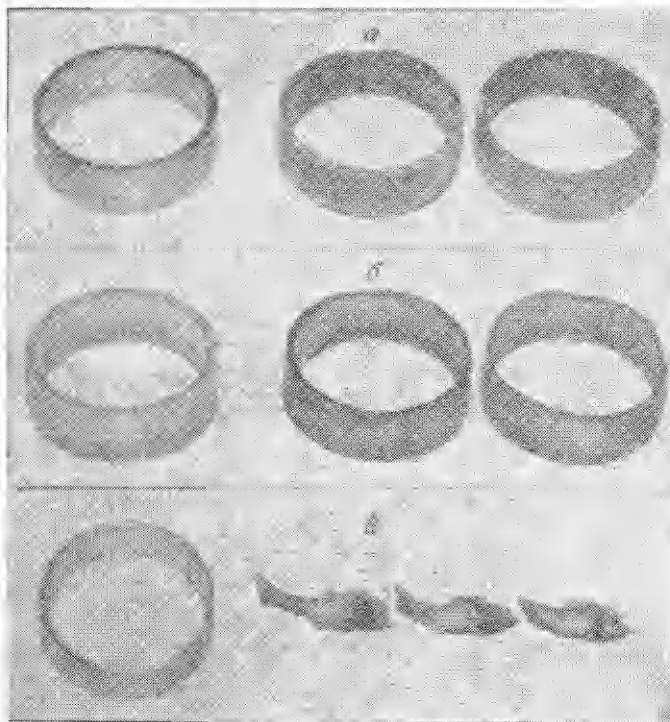


Рис. 4. Вставки из различных материалов до и после сжигания пироксилинового пороха.

газом поверхностный слой исследуемого тела нагревается до плавления за время, пропорциональное температуре плавления вещества.

В условиях проведенных экспериментов даже в химически активной среде этот вывод остается верным: медные и стальные кольца, установленные в критическом сечении соплового блока, при постоянных давлении и интенсивности закрутки потока практически не претерпевают никаких изменений; однако кольца из более легкоплавкого алюминиевого сплава подвергаются сильной эрозии с явными признаками поверхностного плавления. Характерно, что эрозионное выгорание порохов в звуковом потоке сильно зависит от давления ( $\sim p^{0,8}$ ) и практически не зависит от величины показателя степени  $\nu$  в законе горения  $u=bp^\nu$ ; оно по характеру близко к выгоранию колец из органического стекла [10] (см. рис. 4). При этом скорость эрозионного уноса массы пропорциональна скорости плавления поверхностного слоя вещества.

Увеличение глубины прогрева поверхности алюминиевых колец и блоков за счет интенсификации закрутки приводит к росту эрозионного уноса расплавленного слоя в виде отдельных частиц и капель. Последние, находясь в высокотемпературном активном потоке, способны воспламеняться и переходить в стадию парофазного горения, образуя на выходе из соплового блока характерные следы-треки (см. рис. 3, б). Это ведет к дополнительному энерговыделению, к повышению температуры потока и росту его плотности за счет присутствия конденсированных частиц. Общий эффект качественно такой же, как и при применении металлизированных порохов. Увеличение длины соплового блока, с одной стороны, приводит к увеличению времени химической реакции в нем, а с другой — к росту эффекта коагуляции частиц — их укрупнению. Подтверждением этому является вид истекающей струи (см. рис. 3, в) и дополнительный прирост импульса удельной тяги.

Теплоизоляция тонких колец из алюминиевого сплава, ограничивая теплопередачу в глубь блока, усиливает процесс эрозионного образования частиц и капель, а тем самым и полноту его химического реагирования в сопле.

Таким образом, в условиях высокотемпературного высокоскоростного потока продуктов сгорания нитроглицеринового пороха при давлении до 200 атм воспламенение и парофазное горение блоков и пластин (колец) из алюминиевого сплава не наблюдается; горят образующиеся при эрозионном уносе поверхностного расплавленного слоя частицы и капли металла. Эффективность горения пропорциональна скорости подвода тепла из газового потока и при организации вращательно-поступательного движения потока — интенсивности его закрутки. Горящие капли алюминия могут служить гетерогенным источником зажигания легковоспламеняющихся материалов и причиной выхода из строя аппаратуры [1].

*Поступила в редакцию  
1/VI 1977*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Иванов. Безопасность применения металлов в контакте с кислородом. М., «Химия», 1974.
2. В. И. Розенбанд. ФГВ, 1974, 10, 2.
3. W. H. Dorganse. *Viscons Hypersonic Flow*, McGraw Hill. New York, 1962.
4. E. G. Plett, A. C. Alkidas a. o. *J. of Heat Transfer*. Paper N 75HT-M.
5. Ю. А. Гостинцев. МЖГ, 1969, 4.
6. А. Магер. Ракетная техника, 1961, 8.
7. З. Р. Горбис. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. М., «Энергия», 1970.
8. Л. А. Вулис. Изв. АН СССР, ОТН, 1957, 10.
9. U. U. Landau. *Quart. of Appl. Math.*, 1950, 8, 81.
10. А. Ф. Беляев. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М., «Наука», 1968.

---

### О ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ БЕЗГАЗОВОГО РЕЖИМА ГОРЕНИЯ ОТ ДАВЛЕНИЯ

*В. И. Вершинников, А. К. Филоненко*

*(Черноголовка)*

Проведенные расчеты адиабатических температур горения и состояния исходных и конечных продуктов горения при этих температурах показывают [1, 2], что большой класс систем металл — неметалл, состоящих из смеси порошков переходных металлов с бором, углеродом, кремнием и некоторыми другими неметаллами, горит по так называемому безгазовому механизму. Согласно определению безгазового режима горения, все исходные реагенты, конечные и промежуточные продукты горения находятся в конденсированном состоянии, поэтому скорость горения в безгазовом режиме не должна зависеть от внешнего давления инертного газа [3]. Эти явления впервые наблюдались при горении хромоалюминиевого термита [4], в дальнейшем на безгазовом составе на основе железоалюминиевого термита [5] и в последнее время