

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СТРУЕЙ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Г. В. Кузнецов, Т. Н. Немова, Л. А. Савельева

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики при Томском государственном университете, 634050 Томск, ntn@ftf.tsu.ru

Экспериментально исследована взаимосвязь между исходным составом типичных металлизированных твердых топлив, физико-химическими превращениями при их горении и интенсивностью разрушения конструкционных материалов при воздействии струй продуктов сгорания. Установлено, что конденсированные компоненты продуктов сгорания (оксиды алюминия и железа) играют определяющую роль в процессе разрушения конструкционных материалов.

Ключевые слова: твердое топливо, горение, состав, разрушение, конденсированные компоненты.

ВВЕДЕНИЕ

Расширение области применения алюминизированных твердых топлив [1] возможно при наличии достоверных средств прогнозирования последствий воздействия струй продуктов сгорания твердых топлив как на элементы технологических трактов, так и на окружающую среду. Типичным примером такого воздействия является абразивное воздействие гетерогенной струи продуктов сгорания металлизированных твердых топлив на конструкционные материалы (КМ) технологических установок и устройств [1]. Однако абразивное воздействие таких струй может быть и позитивным, например, при использовании в устройствах для резки или перфорации КМ сверхзвуковой струей продуктов сгорания [2].

Конденсированные продукты сгорания представляют собой смесь оксидов металлов [3]. Экспериментально установлено [4], что повышение концентрации частиц металлов и их оксидов в исходном составе твердого металлизированного топлива приводит к увеличению скорости разрушения КМ, что обусловлено абразивным воздействием частиц на «размягченный» при нагреве до высоких температур тонкий приповерхностный слой КМ [5]. Следовательно, эффективность использования металлизированных твердых топлив в качестве газогенерирующего компонента в устройствах резки и перфорации будет опре-

деляться характеристиками образующихся конденсированных продуктов горения.

В научной литературе вопрос разрушения КМ под действием сверхзвуковых струй продуктов сгорания твердых топлив, содержащих частицы металлов, недостаточно освещен. Это обусловлено, прежде всего, тем, что большинство экспериментальных и численных исследований проводилось для струй слабой запыленности, а распределение частиц по размерам полагалось в расчетах монодисперсным.

В реальных условиях при использовании твердых металлизированных топлив для генерации гетерогенных струй распределение конденсированных продуктов сгорания по размерам является полидисперсным; частицы различаются по составу, плотности, концентрации, химической активности. В настоящее время нет работ, в которых при установлении механизма разрушения КМ учитывались бы все эти параметры. Поэтому для решения проблемы разрушения КМ сверхзвуковой струей продуктов сгорания необходимо для конкретных твердых топлив установить закономерности образования конденсированных продуктов и влияние их состава на абразивные свойства гетерогенной струи.

Цель данной работы — экспериментальное исследование образования конденсированных продуктов сгорания ряда типичных металлизированных твердых топлив, различающих-

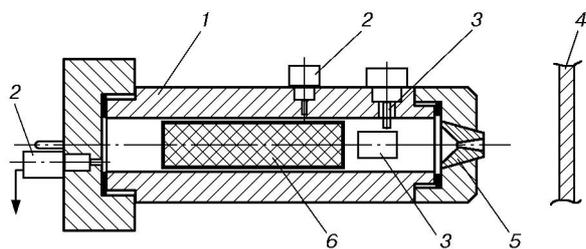


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 — камера сгорания; 2 — датчики давления ЛХ-412; 3 — система воспламенения; 4 — преграда (КМ); 5 — сопловой блок; 6 — заряд твердого топлива

ся концентрацией и составом частиц; определение компонентов и концентраций продуктов сгорания, которые оказывают влияние на эффективную плотность гетерогенной струи продуктов сгорания и, соответственно, на интенсивность абразивного воздействия.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Эксперименты проводили на газодинамическом стенде [4, 5], моделирующем воздействие гетерогенной струи на различные КМ при истечении в атмосферу (рис. 1). Стенд включал в себя камеру сгорания, сопловой блок, заряд твердого топлива, систему управления и регистрации параметров.

Заряды твердого топлива представляли собой сплошные и полые цилиндры с одинаковым внешним диаметром, бронированные специальным составом по боковой поверхности и одному торцу (для обычных цилиндров) или по обоим торцам (для полых цилиндров). Длину зарядов разной конфигурации выбирали таким образом, чтобы соблюдалось равенство площадей горения [6]. Топливо зажигалось посредством вспомогательного топлива и электровоспламенителя.

Давление в камере сгорания, рассчитываемое по методике [7], варьировалось в диапазоне $6 \div 20$ МПа; в течение эксперимента давление контролировалось датчиками ЛХ-412 с погрешностью 5 %.

Продукты сгорания твердого топлива истекали из камеры через сопловой блок, в котором было установлено профилированное сопло. Для настоящих исследований диаметр критического сечения сопла составлял 3 мм. Экспе-

риментально установлено, что сопло меньшего диаметра забивается конденсированными продуктами.

Модели представляли собой пакет из плоских пластин, изготовленных из нелегированной стали с содержанием углерода $0,3 \div 0,4$ % (Ст. 3, Ст. 4, Ст. 45). Пакет с помощью держателя устанавливали перпендикулярно оси струи продуктов сгорания на расстоянии $1 \div 3$ см от среза сопла [5]. Для определения линейной скорости разрушения на задние стенки пластин, составляющих пакет, соосно со струей зачеканивались хромель-алюмелевые термопары диаметром $100 \div 200$ мкм. Время от начала воздействия струи на КМ до момента разрушения горячих спаев термопар при прохождении через них фронта разрушения фиксировалось с помощью осциллографа. Линейную скорость разрушения рассчитывали с учетом глубины заделки термопар (толщины пластин) с погрешностью не более 6 %. Скорость массового уноса G ($\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) определяли согласно [8] по формуле $G = V\rho$, где V — линейная скорость разрушения, ρ — плотность стали.

Для визуального, качественного и количественного анализа конденсированных продуктов сгорания твердых топлив и разрушения КМ в ходе эксперимента проводили отбор частиц с использованием специальной камеры, в которую помещали часть установки, включающую модель и сопловой блок. В ходе анализа из общего количества твердых продуктов сгорания удаляли водорастворимые составляющие и затем исследовали нерастворимую часть.

При исследованиях использовали металлизированные твердые топлива, основные характеристики которых приведены в таблице. Качественный и количественный состав частиц металлов в топливных композициях существенно различался. Так, в топливе I содержалось небольшое количество частиц оксида магния, топлива II и III различались концентрацией алюминия, а в топливную композицию IV наряду с алюминием входили частицы железа. При этом содержание частиц металла в композициях III и IV близко.

Основные результаты экспериментов. На рис. 2 показана зависимость массовой скорости разрушения стали от концентрации частиц металла в исходном составе топливной композиции. С увеличением концентрации частиц металлов (см. таблицу) массовая скорость разрушения стали увеличивается.

Характеристики	Топливные композиции			
	I	II	III	IV
Коэффициент избытка окислителя	0,75	0,70	0,57	0,59
Массовое содержание металла в топливе, %	MgO — 2,3	Al — 18	Al — 26	Fe — 10 Al — 13
Состав конденсированных продуктов сгорания, %	MgO — 92 Сажа — 8	Al ₂ O ₃ — 93,4 Сажа — 5,49	Al ₂ O ₃ — 92,4 Сажа — 1,0	Al ₂ O ₃ — 33,2 Fe ₂ O ₃ — 19,4 KCl — 47,0 Сажа — 0,4
Плотность продуктов сгорания, г/л	0,1	1,6	2,2	3,81
Плотность всех твердых продуктов сгорания, г/см ³	3,37	3,54	3,46	3,61
Объем газообразных продуктов, л/г	0,95	1,0	0,89	0,3
Содержание всех твердых продуктов, г/г	0,025	0,36	0,52	0,723
Содержание оксидов алюминия и железа, г/г	—	0,34	0,52	0,52

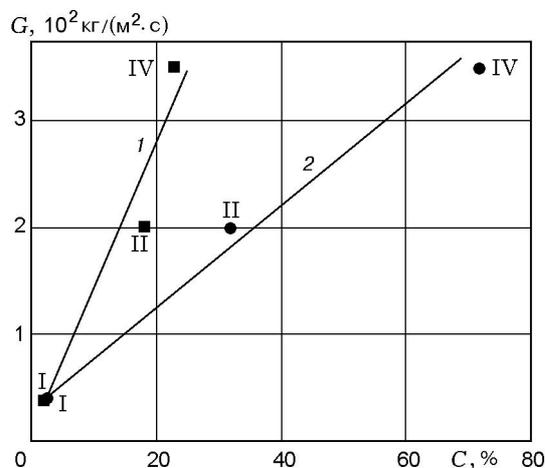


Рис. 2. Зависимость массовой скорости разрушения стали от начальной концентрации частиц металла в твердом топливе (1) и расчетной концентрации всех твердых компонентов в продуктах сгорания (2):

I–IV — топливные композиции, см. таблицу

На рис. 3 приведены типичные фотографии кратера, образованного в стали в результате воздействия струи продуктов сгорания твердого топлива. Для наглядности использовалась модель, состоящая из одной пластины стали с большой толщиной, исключающей образование сквозного отверстия. Глубина кратера 24 мм, диаметр входного отверстия 12 мм.

Кратеры, образованные при разрушении стали струями продуктов сгорания топлив

I–IV, различались только размерами. Глубины кратеров соответствовали результатам измерений массовой скорости разрушения (см. рис. 2, кривая 1).

Визуальный анализ, проведенный при помощи оптических приборов с увеличением изображения в 7–10 раз, позволил получить следующую картину распределения твердых продуктов сгорания по поверхности преграды после экспериментов:

- на стенках, кромке и дне кратера отсутствуют следы расплавленных веществ;
- на поверхности преграды вокруг входного отверстия кратера осаждается темный сажеобразный слой;
- в донной части кратера скапливается серая масса (шлак), легко отделяемая от поверхности кратера.

В экспериментах с топливной композицией IV вся поверхность преграды была покрыта пылеобразным налетом белого цвета.

Был проведен анализ твердых продуктов сгорания топливных композиций III и IV. Массовое содержание частиц металла в этих композициях было приблизительно одинаковым, однако состав частиц различался (см. таблицу).

Мелкодисперсный порошок белого цвета, собранный с поверхности стального образца после эксперимента с использованием топливной композиции IV, растворялся в воде полно-

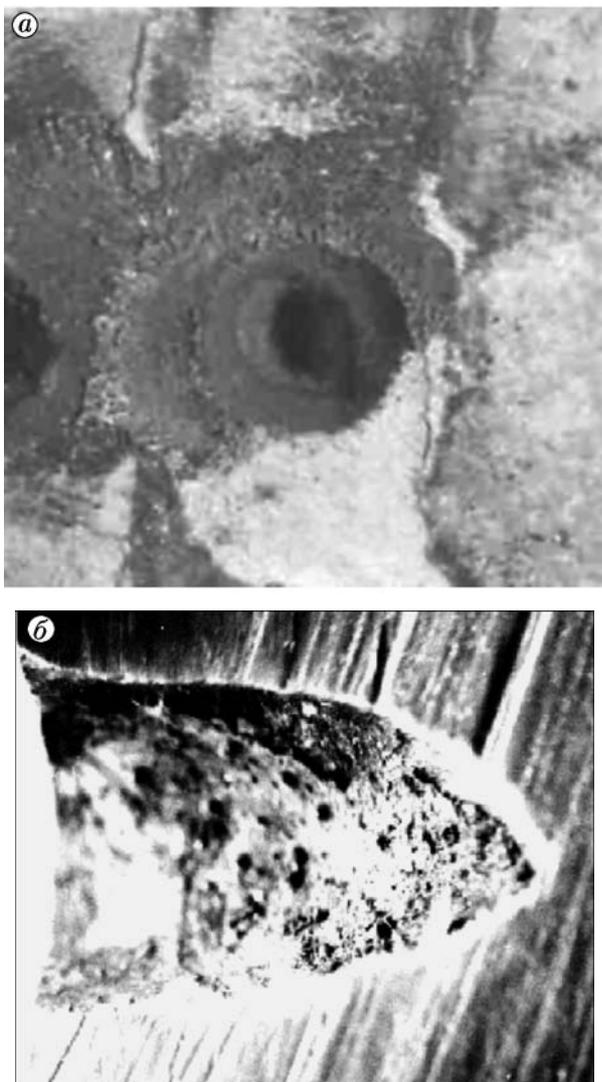


Рис. 3. Типичные фотографии кратера со стороны струи (а) и в разрезе по оси симметрии (б)

стью и представлял собой хлорид калия. Сажеобразный слой вблизи входного отверстия кратера на 95 ÷ 98 % состоял из частиц углерода (сажи).

Продукты сгорания (шлак), собранные в кратере, промывали в воде до нейтральной реакции и анализировали. Остаток представлял собой порошок буровато-черного цвета — оксидов железа с отдельными частицами металла. Присутствие единичных частиц металла только на поверхности шлака обусловлено, по-видимому, прекращением физико-химических процессов окисления частиц железа при завершении горения заряда твердого топлива и рез-

ким изменением в связи с этим параметров струи.

На основании брутто-формул исследованных топливных композиций были рассчитаны коэффициенты избытка окислителя (см. таблицу) и установлены исходные компоненты, ответственные за образование конденсированных продуктов сгорания. Так, для твердого топлива IV такими компонентами являются частицы металлов — алюминия и железа, окислитель — перхлорат калия и органическое связующее типа эпоксидной смолы. Для топливной композиции III источниками твердых продуктов являются частицы алюминия и органическое связующее — нитросоединение.

В результате окисления частиц металлов образуются конденсированные продукты — оксиды металлов [3].

На основании эквивалентных элементных формул топливных композиций и анализа возможных химических реакций между их компонентами были рассчитаны [9] состав и концентрация оксидов алюминия и железа в продуктах сгорания, зависящие от концентрации частиц металла в твердом топливе и полноты окисления, определяемой коэффициентом избытка окислителя [10].

Для топлив III и IV определяющими реакциями при окислении металлов являются [9, 11]:

— окисление алюминия:



— окисление железа:



(1)



— распад перхлората калия:



Для всех композиций, как показали эксперименты, наличие в топливе органического связующего и его окисление приводят к образованию сажи [9], расчетное количество которой не превышает 1,5 %.

Таким образом, конденсированные продукты сгорания исследованных топливных композиций представляют собой смесь оксидов магния и алюминия с сажой для композиций I, II, III и хлорида калия, оксидов железа и алюминия и сажи для композиции IV.

Экспериментально определенная масса конденсированных продуктов сгорания на $10 \div 15$ % превышала расчетное количество оксидов металлов, образующихся при сгорании топливной композиции IV. Расхождение результатов расчета и количественного анализа может быть объяснено тем, что в состав нерастворимых продуктов сгорания входят твердые частицы, образующиеся при разрушении стального образца в зоне кратера.

С использованием программы «АСТРА.4» были рассчитаны характеристики и равновесный состав продуктов горения твердых топлив при заданных температуре и давлении в камере сгорания. Содержание конденсированных продуктов в камере сгорания, состоящих из оксидов алюминия и железа, для композиций III и IV практически одинаковое. Эти результаты согласуются с расчетами конденсированных продуктов сгорания, выполненными по химическим уравнениям окисления металлов (1).

Установлено, что увеличение давления в камере сгорания не приводит к изменению количественного соотношения конденсированных компонентов.

Сравнение результатов расчета содержания твердых компонентов в камере сгорания, в области критического сечения и на срезе сопла показали, что доля конденсированных продуктов сгорания незначительно увеличивается при движении гетерогенной струи от поверхности горения к выходному сечению сопла. Рекомбинация ионов с образованием стабильных продуктов может происходить только при дальнейшем движении частиц; при этом концентрация конденсированных продуктов сгорания в струе повышается.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Газообразные продукты сгорания топливной композиции IV состоят в основном из оксидов углерода и паров воды [3] и содержат дополнительно оксиды азота (для топлива III). Были сделаны оценки плотности продуктов сгорания (см. таблицу); значения плотностей для всех топлив согласуются с массовой концентрацией частиц в исходных композициях и массой конденсированной фазы в продуктах сгорания. Следовательно, рост скорости разрушения КМ [5] обусловлен увеличением массовой концентрации частиц в струе, приводящим

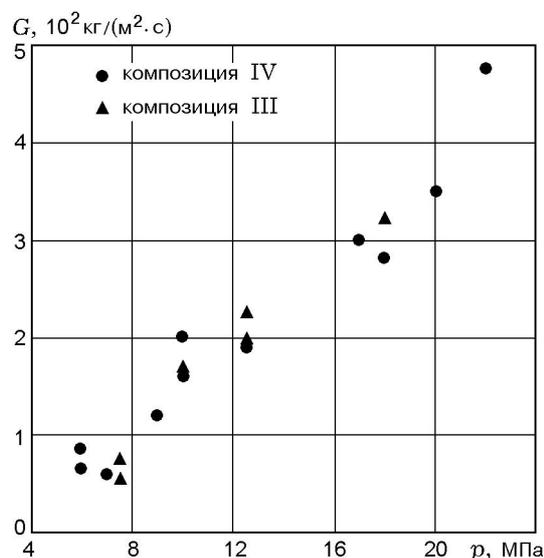


Рис. 4. Зависимость массовой скорости разрушения стали продуктами сгорания твердых топлив III и IV от давления в камере газогенератора

к повышению эффективной плотности гетерогенного потока.

На рис. 2 (кривая 2) приведена зависимость массовой скорости разрушения стали от расчетной концентрации всех образующихся в процессе горения топлива твердых компонентов. С ростом содержания твердых частиц в гетерогенной струе (см. таблицу) массовая скорость разрушения стали линейно увеличивается [4, 5].

Выполнены расчеты доли оксидов металлов в составе конденсированных продуктов сгорания; для композиций III (Al_2O_3) и IV (Al_2O_3 и Fe_2O_3) они практически одинаковы (см. таблицу) и существенно больше, чем для композиции II.

На рис. 4 показана зависимость массовой скорости разрушения стали от давления в газогенераторе. Видно, что результаты измерений для топливных композиций III и IV близки. Следовательно, определяющую роль в процессе разрушения стали играют тяжелые твердые продукты (оксиды металлов). В пользу этого говорит, во-первых, тот факт, что для топливных композиций II и III основным (и тяжелым) твердым продуктом горения является Al_2O_3 (см. таблицу), а во-вторых, хорошее совпадение значений массовой скорости разрушения стали для композиций III и IV.

Таким образом, разрушение стали в одинаковых условиях обусловлено массовым содержанием в продуктах сгорания тяжелых компонентов.

При исследовании взаимодействия сверхзвуковой струи продуктов сгорания металлизированных твердых топлив с КМ необходимо учитывать процесс агломерации, вследствие которого образуются частицы алюминий — оксид алюминия [12, 13]. В работах, посвященных изучению агломерации, показано, что образование агломератов происходит на поверхности горящего топлива; при этом размер частиц достигает 600 мкм, а горение алюминия в агломератах заканчивается уже на расстоянии 2,5 см от поверхности горения [13]. Это согласуется с результатами анализа продуктов сгорания, собранных с поверхности образца КМ и в кратере; в конденсированных продуктах сгорания не обнаружено частиц несгоревшего алюминия.

Известно, что частицы хлорида калия и сажи, образующиеся в результате горения твердых топлив, способствуют агломерации и этот процесс интенсивно протекает уже при $450 \div 500$ °С [14]. Кроме того, нельзя исключить возможность включения в агломераты частиц железа, входящих в состав твердого топлива IV. Таким образом, поверхности разрушающегося материала должны достигать достаточно крупные по сравнению с исходными частицы [6, 12], а увеличение размеров частиц должно повышать эффективность термомеханического разрушения конструкционного материала. Это обусловлено тем, что под действием сил инерции более крупные частицы практически не отклоняются от оси струи и продвигаются в пограничном слое вблизи разрушаемой поверхности на большую глубину по сравнению с мелкими частицами, достигая поверхности КМ. При этом увеличивается касательное напряжение трения гетерогенного потока [5], что приводит к повышению массовой скорости разрушения. Однако известно, что увеличение размера частиц в гетерогенной струе способствует снижению скорости частиц, что должно бы привести к уменьшению касательных напряжений трения потока.

В [15] в результате численных исследований с учетом разгона частиц в сопле и струе и торможения их в кратере получены зависимости скорости удара и кинетической энергии от диаметра частиц и давления в камере как для одиночной частицы, так и для слабозапыленно-

го потока. В частности, при давлении в камере 2 МПа и глубине кратера $2 \cdot 10^{-2}$ м скорость частиц при увеличении диаметра частиц SiO_2 от 50 до 150 мкм понижается с 750 до 500 м/с. Получена функция экстремумов кинетической энергии воздействующих на дно каверны частиц от давления в камере и диаметра частиц [15]. Показано [15], что кинетическая энергия слабо зависит от давления и размера частиц, что позволило получить взаимосвязывающую зависимость оптимальных значений давления и размера частиц, необходимых для достижения гетерогенной струей максимальной кинетической энергии.

Сравнение результатов [15] с условиями экспериментов настоящей работы показывают, что диапазон давлений в камере сгорания $6 \div 20$ МПа и диапазон размеров частиц $10 \div 200$ мкм оптимальны по заключению [15] и обеспечивают максимальные значения кинетической энергии потока. В этих условиях интенсификация разрушения обусловлена конденсированными продуктами горения твердых топлив, которые при максимальных значениях кинетической энергии потока достигают поверхности КМ. Такими конденсированными продуктами являются крупные частицы, почти не отклоняющиеся от оси струи при движении к поверхности КМ (дну кратера).

Полученные экспериментальные данные характеризуют не только связь интенсивности абразивного воздействия гетерогенной струи продуктов горения на типичный конструкционный материал, но и служат дополнительной основой для построения моделей, описывающих физико-химические процессы при горении металлизированных твердых топлив. Последствия этих процессов имеют самостоятельное значение. Так, ранее экспериментально было показано [16], что разрушение стали не сопровождается ее плавлением; тонкий приповерхностный слой материала прогревается до температуры не выше 1000 К, при которой начинаются полиморфные превращения структур стали, вследствие чего она теряет свои прочностные качества. Повышение концентрации частиц в гетерогенной струе увеличивает ее плотность и напряжение трения потока. Если бы разрушение стали было обусловлено плавлением, то в условиях сверхзвукового воздействия концентрация частиц в гетерогенной струе не влияла бы на процесс разрушения. Однако в данной работе экспериментально уста-

новлено такое влияние и можно считать этот факт еще одним аргументом в пользу модели термомеханического разрушения КМ сверхзвуковой высокотемпературной струей с высокой концентрацией частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследована взаимосвязь между исходным составом типичных металлизированных твердых топлив, физико-химическими превращениями при их горении и интенсивностью разрушения КМ при воздействии струй продуктов сгорания таких топлив. Показано влияние концентрации частиц на скорость разрушения типичного конструкционного материала — стали. Установлено, что конденсированные продукты — оксиды металлов — обуславливают повышение эффективной плотности продуктов сгорания и определяют процесс разрушения стали. Результаты экспериментов могут служить основой для построения физических моделей процесса разрушения КМ струями продуктов сгорания твердых топлив и использования их в устройствах для резки и перфорации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комаров В. Ф., Шандаков В. А. Твердые топлива, их особенности и области применения // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 2. С. 30–34.
2. Пат. РФ № 2066603. Способ теплоэрозионной резки / Абалтусов В. Е., Алексеенко Н. Н., Немова Т. Н., Зима В. П., Полежаев Ю. В., Михатулин Д. С. 1996.
3. Паушкин Я. М. Жидкие и твердые химические ракетные топлива. М.: Наука, 1978.
4. Абалтусов В. Е., Алексеенко Н. Н., Немова Т. Н. и др. Экспериментальное исследование термохимического и эрозионного разрушения материалов при взаимодействии с высокотемпературными гетерогенными потоками // Теплофизика и аэромеханика. 1996. Т. 3, № 1. С. 59–63.
5. Абалтусов В. Е., Кузнецов Г. В., Немова Т. Н. Исследование высокотемпературного разрушения металлов при взаимодействии с гетерогенным потоком с высокой концентрацией частиц // Теплофизика высоких температур. 1999. Т. 37, № 3. С. 438–444.
6. Эйзель, Браун. Влияние давления, скорости и геометрии на размеры частиц Al_2O_3 , образующихся при горении алюминизированного твердого топлива // Ракетная техника и космонавтика. 1975. Т. 13, № 7. С. 89–95.
7. Соркин Р. Е. Теория внутрикамерных процессов в ракетных системах на твердом топливе. М.: Наука, 1983.
8. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976.
9. Немова Т. Н., Савельева Л. А. Влияние состава продуктов сгорания на разрушение стали гетерогенной струей // Докл. II Всесоюз. науч. конф., Томск, 6–8 июня 2000. Томск, 2000. С. 195–196.
10. Venugopalan S., Sarwade D. B., Agrawal J. P. Role of oxygen balance on the thermal decomposition behaviour of composite propellants // Indian J. Eng. Mater. Sci. 1994. V. 1, N 5. P. 289–291.
11. Бабук В. А., Васильев В. А., Романов О. Я. и др. Физико-химические превращения капель $Al-Al_2O_3$ в активном газовом потоке // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 3. С. 129–133.
12. Глотов О. Г. Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив. II. Эволюция частиц при удалении от поверхности горения // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 4. С. 66–78.
13. Salita Mark. Measurement and analysis of particulate formed during combustion of aluminized solid propellants in a quench bomb // Particul. Sci. Technol. 1992. V. 10, N 3–4. P. 97–98.
14. Скляр М. Г. Физико-химические проблемы спекания углей // Материалы VIII Всесоюз. симпозиума по горению и взрыву. Октябрь 1986, Ташкент. Черноголовка, 1986. С. 100–103.
15. Михатулин Д. С., Немова Т. Н., Полежаев Ю. В., Ревизников Д. Л. Гетерогенные режущие устройства: оптимизация газодинамического тракта разгона частиц // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8, № 2. С. 301–310.
16. Кузнецов Г. В., Алексеенко Н. Н., Немова Т. Н. Разрушение стали высокотемпературным гетерогенным потоком с большой концентрацией частиц // Физика и химия обработки материалов. 2000. № 5. С. 79–86.

Поступила в редакцию 28/XI 2001 г.,
в окончательном варианте — 6/VI 2002 г.